

Grado Universitario en Ingeniería Telemática 2017-  
2018

*Trabajo Fin de Grado*

# “Desarrollo de un SUAS basado en tecnologías Open Source para actividades de investigación”

---

Daniel Gómez Illanes

Tutor

Iván Vidal Fernández

Madrid, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons  
**Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## **RESUMEN**

En esta memoria se recoge el estudio y desarrollo de un sistema aéreo no tripulado. El principal objetivo se centra en la integración de un ordenador a bordo de un dron que forma parte de un sistema aéreo, y el control sobre éste de una forma sencilla e intuitiva. Existen diferentes proyectos de grandes corporaciones internacionales como Google y Facebook que tienen como núcleo de su desarrollo este tipo de sistemas o drones. Cada vez son más utilizados en multitud de tareas, y es que la rentabilidad de utilizar drones en vez de otras opciones como helicópteros o aviones tripulados es más que evidente.

A lo largo del presente documento se detallan las características de cada componente a utilizar, así como un estudio previo y el consecuente montaje e integración dentro del sistema. Se pretende establecer una base sobre la que realizar futuros trabajos de investigación que estudien la viabilidad de proporcionar diferentes servicios a través de sistemas aéreos no tripulados. El sistema desarrollado proporciona un gran número de posibilidades que pueden establecerse alrededor del ordenador del dron, puesto que las pruebas realizadas aportan un gran nivel de eficiencia en cuanto a posibilidad de comunicaciones y ancho de banda útil. El software necesario para el desarrollo del sistema se basa en herramientas Open Source, puesto que se pretender facilitar la difusión del proyecto y la experimentación sobre este.

Por último, resaltar que se ha llevado a cabo un estudio del presupuesto empleado en el desarrollo del proyecto, ya que es probable que sea necesario replicarlo y proporcionar servicio con más de un dron en activo.

### **Palabras clave**

SUAS; Sistema aéreo no tripulado; Dron; Raspberry PI; Navegación GPS; dRonin.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| 1.1.   | Motivación del Trabajo.....                                   | 1  |
| 1.2.   | Objetivos.....  | 2  |
| 2.     | ESTADO DE LA CUESTIÓN.....                                    | 4  |
| 2.1.   | Drones.....   | 4  |
| 2.1.1. | Definición.....   | 4  |
| 2.1.2. | Clasificación.....  | 4  |
| 2.1.3. | Sistema aéreo no tripulado.....                               | 6  |
| 2.2.   | Marco regulador.....  | 7  |
| 2.3.   | Diseño de soluciones actuales.....                            | 9  |
| 3.     | ANÁLISIS GENERAL .....  | 11 |
| 3.1.   | Análisis de Requisitos.....                                   | 11 |
| 3.2.   | Software controlador de vuelo.....                            | 12 |
| 3.3.   | Componentes necesarios.....                                   | 13 |
| 3.3.1. | Placa FC .....  | 13 |
| 3.3.2. | Motores y hélices .....                                       | 13 |
| 3.3.3. | ESC.....  | 16 |
| 3.3.4. | Emisora y Receptor .....                                      | 17 |
| 3.3.5. | Módulo GPS.....   | 18 |
| 3.3.6. | Raspberry PI.....   | 18 |
| 3.3.7. | Estructura y brazos del dron.....                             | 18 |
| 3.3.8. | Fuentes de energía.....                                       | 19 |
| 3.3.9. | Cargadores de las fuentes.....                                | 19 |
| 3.4.   | Herramientas de desarrollo, construcción y mantenimiento..... | 20 |
| 3.4.1. | Relacionadas con el software .....                            | 20 |
| 3.4.2. | Relacionadas con el montaje.....                              | 20 |
| 4.     | DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL QUADCOPTERO .....               | 22 |
| 4.1.   | Instalación del software dRonin .....                         | 22 |
| 4.1.1. | GCS .....   | 22 |
| 4.1.2. | FC software .....   | 22 |
| 4.2.   | Soldadura de la PDB.....                                      | 23 |
| 4.3.   | Integración de FC y receptor .....                            | 24 |
| 4.4.   | Montaje y conexión de los motores .....                       | 27 |
| 4.5.   | Configuración del FC.....                                     | 28 |
| 4.5.1. | Primeros pasos.....   | 28 |
| 4.5.2. | Output.....   | 29 |
| 4.5.3. | Input .....   | 32 |
| 4.6.   | Montaje del módulo GPS.....                                   | 34 |
| 4.7.   | Integración de la batería.....                                | 37 |
| 4.8.   | Integración de la Raspberry PI.....                           | 40 |
| 5.     | INTEGRACIÓN DE TODOS LOS SISTEMAS .....                       | 42 |
| 5.1.   | Preparación Raspberry PI .....                                | 42 |
| 5.2.   | Comunicación GCS-Dron.....                                    | 43 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.3. | Comunicación a través de la Raspberry PI (Wi-Fi). | 47 |
| 5.4. | Comunicación a través de la Raspberry PI (LTE).   | 54 |
| 6.   | PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS                  | 64 |
| 6.1. | Primera comprobación de vuelo.                    | 64 |
| 6.2. | Vuelo completo y Autotune                         | 64 |
| 6.3. | Vuelo tras Autotune                               | 64 |
| 6.4. | Vuelo con módulo GPS integrado                    | 65 |
| 6.5. | Vuelo con funcionalidad GPS                       | 67 |
| 6.6. | Ancho de banda ofrecido                           | 68 |
| 7.   | GESTIÓN DEL PROYECTO                              | 70 |
| 7.1. | Planificación                                     | 70 |
| 7.2. | Presupuesto                                       | 71 |
| 8.   | CONCLUSIONES                                      | 73 |
| 8.1. | Objetivos cumplidos.                              | 73 |
| 8.2. | Consideraciones futuras en proyectos similares    | 73 |
| 8.3. | Futuras líneas de trabajo.                        | 74 |
|      | ANEXO A. IMÁGENES DEL DRON                        | 75 |
|      | ANEXO B. SUMMARY IN ENGLISH                       | 81 |
|      | BIBLIOGRAFÍA                                      | 86 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Dron en vuelo [2].....  | 4  |
| Figura 2.2 Helicóptero [5].....  | 5  |
| Figura 2.3 Distintas distribuciones de las hélices de un dron [4] .....      | 5  |
| Figura 2.4 Drones trabajando en el campo agrónomo y militar [6], [7] .....   | 6  |
| Figura 2.5 Esquema de los sistemas que forman un SUAS [9] .....              | 6  |
| Figura 2.6 Imagen representativa de la nueva ley de drones [12].....         | 7  |
| Figura 2.7 Imagen del sistema desarrollado por DARPA [13] .....              | 9  |
| Figura 2.8 Dron diseñado por Google [15] .....                               | 9  |
| Figura 2.9 Esquema ilustrativo del proyecto Loon de Google [16] .....        | 10 |
| Figura 2.10 Dron desarrollado por Facebook en el proyecto Aquila [17] .....  | 10 |
| Figura 3.1 Curva de eficiencia del motor BLDC A2212/13T [23] .....           | 15 |
| Figura 4.1 Pantalla de Bienvenida del GCS .....                              | 22 |
| Figura 4.2 Pantalla de Firmware del GCS .....                                | 23 |
| Figura 4.3 Muestra de la soldadura en la PDB .....                           | 24 |
| Figura 4.4 Puertos del FC CC3D Revolution [26] .....                         | 25 |
| Figura 4.5 Imagen del FC con los ESC conectados .....                        | 26 |
| Figura 4.6 Imagen del receptor con sus conexiones .....                      | 27 |
| Figura 4.7 Resumen de la configuración inicial del FC .....                  | 28 |
| Figura 4.8 Procedimiento de calibrado de sensores .....                      | 29 |
| Figura 4.9 Icono Output de la vista Configuration .....                      | 29 |
| Figura 4.10 Panel Output inicial sin configurar .....                        | 30 |
| Figura 4.11 Ventana de advertencia. Recomendado motores sin hélices .....    | 30 |
| Figura 4.12 Panel Output configurado .....                                   | 31 |
| Figura 4.13 Imagen de un brazo del dron en su parte inferior .....           | 31 |
| Figura 4.14 Icono Input de la vista Configuration .....                      | 32 |
| Figura 4.15 Panel RCInput inicial sin configurar .....                       | 32 |
| Figura 4.16 Ejemplo de vista de configuración del input .....                | 33 |
| Figura 4.17 Panel Arming Settings configurado .....                          | 33 |
| Figura 4.18 Panel Flight Mode Switch Settings con Autotune configurado ..... | 34 |
| Figura 4.19 Activación del Módulo Autotune .....                             | 34 |
| Figura 4.20 Rueda de plástico .....  | 36 |
| Figura 4.21 Rueda rebajada, varilla roscada y taco de latón .....            | 36 |
| Figura 4.22 Sujeción del módulo GPS a la estructura del dron .....           | 36 |
| Figura 4.23 Sujeción del módulo GPS a su soporte circular .....              | 36 |
| Figura 4.24 GPS asignado al MainPort .....                                   | 36 |
| Figura 4.25 Icono Modules de la vista Configuration .....                    | 37 |
| Figura 4.26 Relación de módulos .....  | 37 |
| Figura 4.27 Pestaña GPS y configuración disponible .....                     | 37 |
| Figura 4.28 Configuración del divisor de tensión .....                       | 39 |
| Figura 4.29 Lista de módulos .....   | 40 |
| Figura 4.30 Pestaña de configuración del módulo de la batería .....          | 40 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.31 Estructura Raspberry sin batería.....                                     | 40 |
| Figura 4.32 Estructura Raspberry con batería.....                                     | 40 |
| Figura 4.33 Parte superior en contacto con la estructura Raspberry.....               | 41 |
| Figura 4.34 Frontal de la estructura Raspberry.....                                   | 41 |
| Figura 5.1 Escritura microSD (1).....   | 42 |
| Figura 5.2 Escritura microSD (2).....   | 42 |
| Figura 5.3 Comando update.....  | 43 |
| Figura 5.4 Comando upgrade.....   | 43 |
| Figura 5.5 Instalación software socat.....  | 43 |
| Figura 5.6 Reinicio de la Raspberry.....  | 43 |
| Figura 5.7 Script tcplisten.sh.....   | 44 |
| Figura 5.8 Comando que otorga permisos de ejecución.....                              | 45 |
| Figura 5.9 Configuración SSH Raspberry (1).....                                       | 45 |
| Figura 5.10 Configuración SSH Raspberry (2).....                                      | 45 |
| Figura 5.11 Configuración SSH Raspberry (3).....                                      | 45 |
| Figura 5.12 Configuración SSH Raspberry (4).....                                      | 46 |
| Figura 5.13 Puerto HID habilitado.....  | 46 |
| Figura 5.14 Puerto VCP habilitado.....  | 46 |
| Figura 5.15 Ventana del GCS de configuración.....                                     | 47 |
| Figura 5.16 Acceso al archivo /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf.....            | 48 |
| Figura 5.17 Archivo /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf.....                      | 48 |
| Figura 5.18 Acceso al archivo /etc/dhccpd.conf.....                                   | 48 |
| Figura 5.19 Archivo /etc/dhccpd.conf.....   | 48 |
| Figura 5.20 Reinicio de Raspberry.....  | 49 |
| Figura 5.21 Comando de configuración de interfaces de red.....                        | 49 |
| Figura 5.22 Configuración de la interfaz wlan0 (Interfaz Wi-Fi).....                  | 49 |
| Figura 5.23 Configuración contraseña Raspberry (1).....                               | 49 |
| Figura 5.24 Configuración contraseña Raspberry (2).....                               | 49 |
| Figura 5.25 Configuración contraseña Raspberry (3).....                               | 50 |
| Figura 5.26 Configuración contraseña Raspberry (4).....                               | 50 |
| Figura 5.27 Configuración contraseña Raspberry (5).....                               | 50 |
| Figura 5.28 Ventana de Putty para establecer conexión SSH con la IP192.168.1.234..... | 51 |
| Figura 5.29 Requerimiento de credenciales para acceso SSH.....                        | 51 |
| Figura 5.30 Acceso correcto a Raspberry por SSH.....                                  | 52 |
| Figura 5.31 Script tcplisten.sh lanzado en segundo plano.....                         | 53 |
| Figura 5.32 Ventana del GCS de configuración con IP de Raspberry añadida.....         | 53 |
| Figura 5.33 IP de Raspberry lista para conectar.....                                  | 53 |
| Figura 5.34 Comunicación establecida entre GCS-FC a traves de Wi-Fi.....              | 53 |
| Figura 5.35 Disposición de conexiones del Hat [27].....                               | 54 |
| Figura 5.36 Comprobación y verificación de compatibilidad Hat-Raspberry.....          | 55 |
| Figura 5.37 Instalación del software Network Manager Gnome.....                       | 55 |
| Figura 5.38 Configuración conexión LTE. Tipo de conexión.....                         | 55 |
| Figura 5.39 Configuración conexión LTE. Tipo de servicio.....                         | 56 |
| Figura 5.40 Configuración conexión LTE. País.....                                     | 56 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 5.41 Configuración conexión LTE. Proveedor de Internet .....                                    | 56 |
| Figura 5.42 Configuración conexión LTE. Facturación y nombre del punto de acceso.....                  | 57 |
| Figura 5.43 Configuración conexión LTE. Número de teléfono .....                                       | 57 |
| Figura 5.44 Configuración conexión LTE finalizada .....  | 58 |
| Figura 5.45 Instalación de Weaved.....   | 59 |
| Figura 5.46 Inicio de sesión en Weaved .....   | 59 |
| Figura 5.47 Procedimiento para añadir un servicio nuevo.....   | 60 |
| Figura 5.48 Establecimiento del servicio SSH.....  | 60 |
| Figura 5.49 Establecimiento del servicio TCP.....  | 61 |
| Figura 5.50 Establecimiento de conexión LTE (1) .....  | 62 |
| Figura 5.51 Establecimiento de conexión LTE (2) .....  | 62 |
| Figura 5.52 Establecimiento de conexión LTE (3) .....  | 63 |
| Figura 5.53 Establecimiento de conexión LTE (4) .....  | 63 |
| Figura 6.1 Ventana de configuración del entorno GCS .....  | 65 |
| Figura 6.2 Mapa del GCS antes de señal GPS .....   | 66 |
| Figura 6.3 Mapa del GCS después de vuelo con GPS .....   | 66 |
| Figura 6.4 Pestaña Filter Settings .....   | 67 |
| Figura 6.5 Icono Attitude de la vista Configuration .....  | 67 |
| Figura 6.6 Lista de módulos activos en la configuración del FC .....                                   | 67 |
| Figura 6.7 Pestaña de configuración de modos de vuelo. Modo 2 activo con PositionHold.                 | 68 |
| Figura 6.8 Pestaña de configuración de modos de vuelo. Modo 2 activo con ReturnToHome .....            | 68 |
| Figura 6.9 Resultados de ancho de banda con conexión SSH activa.....                                   | 69 |
| Figura 6.10 Resultados ancho de banda con conexiones SSH y TCP activas .....                           | 69 |
| Figura 7.1 Diagrama de Gantt. Planificación del proyecto.....  | 70 |
| Figura 0.1 Núcleo del dron. FC y receptor .....  | 75 |
| Figura 0.2 Dron con los componentes básicos.....   | 76 |
| Figura 0.3 Primer vuelo de prueba con componentes básicos .....  | 76 |
| Figura 0.4 Estructura del dron con GPS instalado y preparado para la instalación de la Raspberry ..... | 77 |
| Figura 0.5 Primera instalación de la Raspberry .....   | 78 |
| Figura 0.6 Dron con componentes preparados para vuelo con telemetría wireless .....                    | 79 |
| Figura 0.7 Detalle del núcleo del dron .....   | 79 |
| Figura 0.8 Despegue con telemetría wireless.....   | 80 |
| Figura 0.9 Vuelo con telemetría wireless.....  | 80 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3.1 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BLDC A2212/13T [23].....                | 14 |
| Tabla 3.2 RENDIMIENTOS DE HÉLICES EN MOTOR BLDC A2212/13T [24] .....        | 15 |
| Tabla 4.1 FUNCIÓN DE LOS PINES MAIN PORT (GPS) [26] .....                   | 35 |
| Tabla 4.2 FUNCIÓN DE LOS PINES POWER SENSOR [26] .....                      | 38 |
| Tabla 7.1 PRESUPUESTO DE LOS COMPONENTES PARA EL DESARROLLO DEL SUAS .....  | 71 |
| Tabla 7.2 PRESUPUESTO DE LAS HERRAMIENTAS DE CNSTRUCCIÓN PARA EL SUAS ..... | 72 |
| Tabla 7.3 PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA .....                              | 72 |
| Tabla 7.4 PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO.....                               | 72 |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación del Trabajo.

Los drones y las redes de comunicaciones son dos temas que se encuentran en pleno auge e investigación hoy en día. El desarrollo de drones en nuevas áreas en las que hasta ahora se empleaban otros medios está comenzando a transformar la manera en la que se ejecutan algunos protocolos. La vigilancia aérea de grandes extensiones, el uso de nuevas tecnologías en la agricultura o el acceso a lugares complicados y la participación en misiones de rescate son algunas de las tareas que actualmente se desarrollan con éxito gracias al gran avance que han experimentado los drones en los últimos años. Incluso el transporte de personas [1] ha sido también objeto de la especulación acerca de si podría ser factible realizarlo a través de este tipo de tecnología. Este campo, por tanto, se encuentra en pleno desarrollo y expansión, lo que hace posible investigar nuevas posibilidades y retos que se puedan afrontar para mejorar las actividades que se realizan en campos que hasta ahora nada han tenido que ver con los drones.

Por otra parte, las redes de comunicaciones también están experimentando en la actualidad un gran avance, y es que la futura llegada del 5G promete ser una gran revolución en la sociedad en todos los sentidos. Las redes de comunicaciones pasarán a ser el pilar fundamental sobre el que se sostenga la sociedad, si es que no lo es ya, y será de vital importancia su mantenimiento y continua mejora para que puedan ser explotados los servicios que ofrezcan. El IoT (*Internet of Things*) o Internet de las cosas tendrá en un futuro próximo una importancia aún mayor que la actual y permitirá que la sociedad viva más cómoda y los procesos sean más automatizados. Lugares a los que no llegue Internet o no haya cobertura serán extensiones sin interés alguno, puesto que cualquier actividad cotidiana no se podrá desarrollar con normalidad.

Integrando los dos conceptos, el de drones y el de redes de comunicaciones, surge la motivación de este proyecto. La idea de desplegar una red de comunicaciones en una determinada área geográfica puede ser complicada en ocasiones debido a varios factores. Un factor puede ser la temporalidad de la red, es decir, el tiempo que necesita estar desplegada para su uso. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en grandes espectáculos con gran afluencia de público. En este caso, el despliegue de una red nueva o de apoyo debería ser de coste reducido para que fuese factible. Otra situación en la que se necesitaría implantar una red nueva en un corto periodo de tiempo sería en caso de cualquier tipo de catástrofe que dejase sin red de comunicaciones a algún núcleo de población. Sería necesario entonces proveer una red de comunicaciones fiable y en el menor tiempo posible para poder además solucionar los problemas que ahí existan a causa de la propia catástrofe. Todos estos problemas motivan la solución que en este trabajo se propone, que no es más que la construcción de un sistema aéreo sin piloto capaz de transportar un pequeño ordenador a bordo al cual se le puedan añadir futuras funcionalidades para que se comunique con cualquier otro sistema que así lo requiera. El objetivo es proporcionar

un soporte para realizar actividades de investigación. Una actividad, por ejemplo, podría parecerse a un gran enjambre de drones conectados entre sí y estableciendo una red de comunicaciones útil desde tierra para poder realizar intercambios de información.

## **1.2. Objetivos.**

En el desarrollo del proyecto se ha seguido un orden estricto para la consecución de los objetivos que se describen y poder hacer así posible la anotación consecuente de los progresos que se consigan. El principal objetivo consiste en implementar un dron para dar soporte a actividades de investigación. Para ello se consideran diferentes objetivos parciales que desemboquen en el principal:

→Uso de tecnologías de software libre.

→Integración en el dron de una plataforma con capacidad de cómputo y almacenamiento suficiente para establecer comunicaciones inalámbricas y transmitir los datos requeridos por el sistema desarrollado.

→Habilitación de canales de comunicaciones que permitan controlar el dron e intercambiar datos entre el dron y otros drones o plataformas en tierra considerando diferentes tecnologías de acceso.

Para la correcta consecución de los objetivos, se pretende realizar las siguientes actividades o pasos:

→Adquisición económica de las piezas necesarias para la construcción del dron.

→Elección e instalación del software de vuelo de la placa controladora y comprobación de su funcionamiento.

→Construcción de la estructura del dron y ejecución de soldaduras necesarias.

→Construcción básica del dron para hacer posible su primer vuelo de prueba.

→Consecución de un vuelo estable y controlado del dron con su estructura básica.

→Construcción completa del dron con funcionalidades adicionales como GPS y medidor de batería.

→Comprobación de funcionalidades completas y verificación mediante la GCS (*Ground Control Station*).

→Integración de un ordenador en la estructura del dron.

→Establecimiento de conexión inalámbrica SSH hacia el ordenador del dron mediante Wi-Fi.

→Establecimiento de conexión inalámbrica TCP entre estación en tierra (GCS) y placa controladora de vuelo mediante Wi-Fi.

- Establecimiento de conexión inalámbrica SSH hacia el ordenador del dron mediante LTE.
- Establecimiento de conexión inalámbrica TCP entre estación en tierra (GCS) y placa controladora de vuelo mediante LTE.
- Establecimiento de conexión entre tierra y dron, y control de su ordenador a bordo.
- Realización de pruebas que determinen el ancho de banda que ofrece el ordenador a bordo del dron.

## 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN.

### 2.1. Drones.

#### 2.1.1. Definición.

Para comenzar el estudio acerca de la cuestión, es relevante conocer qué es un dron y qué utilidades tiene para empezar a comprender sus potenciales utilidades. Un dron es un vehículo aéreo no tripulado, UAV según sus siglas en inglés (*Unmanned Aerial Vehicle*). Éste puede tener cualquier tipo de forma y fin, es decir, no se discrimina entre aviones, helicópteros o multirrotores; todos se denominan drones.



Figura 2.1 Dron en vuelo [2]

Los drones o UAVs empezaron a desarrollarse a finales de la I Guerra Mundial con objetivos militares [3]. Comenzaron siendo objetos de blanco para el entrenamiento de otros sistemas y han ido evolucionando hasta convertirse en un arma de ataque que evita la presencia de un piloto en la zona conflictiva. No ha sido hasta los últimos años cuando la evolución de los drones ha sido notoria, tanto en el ámbito civil como en el militar, precedido de una gran inversión por parte de los gobiernos mundiales.

#### 2.1.2. Clasificación.

Los drones que existen actualmente en el mercado se pueden clasificar atendiendo a diversos factores como pueden ser su arquitectura y su propósito funcional [4].

En lo relativo a su arquitectura, existen dos grandes grupos de drones, los de ala fija o *fixed-wing* y los de ala rotatoria o *rotatory-wing*. Los drones *fixed-wing* son aquellos en los que las propias alas forman parte de la estructura del dron y por tanto no poseen

movimiento propio. Pueden subdividirse en drones de ala alta, media o baja, según su posición respecto a la vertical del dron, o de ala volante, si ésta abarca casi la totalidad de su estructura.

Los drones *rotatory-wing*, por el contrario, son aquellos que poseen alas móviles, denominadas hélices, que hacen posible el vuelo y su correcto control. Dentro de este tipo de drones se puede establecer una clasificación más detallada. Se puede distinguir entre autogiro, helicóptero y multirrotor. El autogiro es lo más parecido a un avión, que se sustenta gracias, además de a sus alas fijas, a un rotor colocado en el mismo lugar que el de un helicóptero y que gira libremente, generando así estabilidad para el dron, que obtiene su impulso de una hélice frontal. El helicóptero realiza el vuelo gracias a un rotor principal y a otro de cola que controla el giro del dron. Por último, el multirrotor es aquel que dispone de tres o más rotores que proporcionan un vuelo estable y que permite que el dron permanezca en un lugar fijo sin necesidad de intervención adicional de piezas aerodinámicas. Los multirrotores, como puede observarse en la FIGURA, pueden disponer de una cantidad variable de rotores que giran en sentidos opuestos para compensar el torque y que el dron sea estable. Los más comunes son los tricópteros, quadrópteros, hexacópteros y octacópteros, siempre atendiendo a su número de rotores.



Figura 2.2 Helicóptero [5]

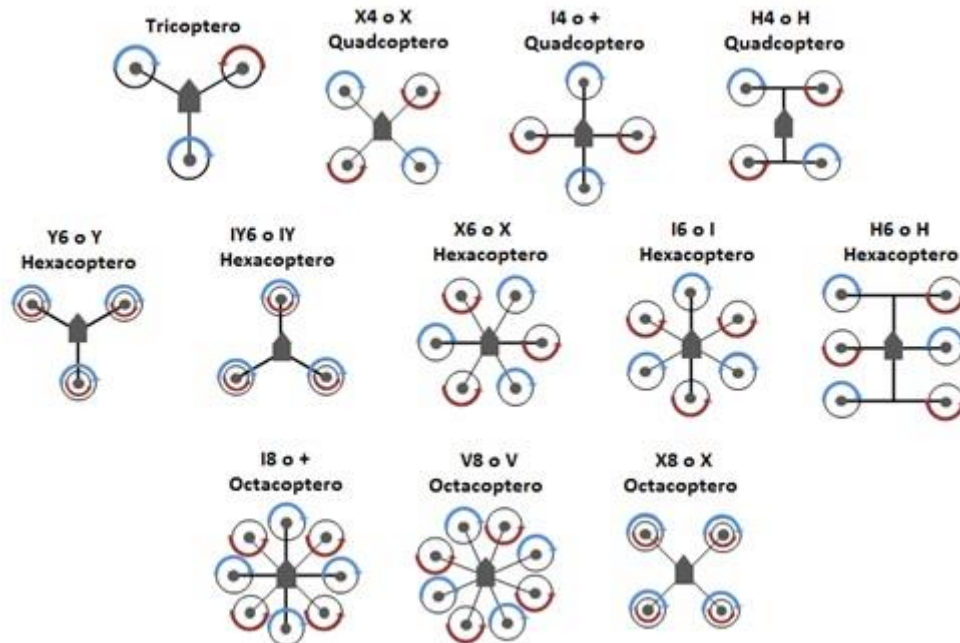


Figura 2.3 Distintas distribuciones de las hélices de un dron [4]

Por otro lado, el propósito funcional de los drones es cada vez más amplio y se está extendiendo su campo de acción en los últimos años. Los drones han abarcado ya tanto el campo civil como el campo militar. Algunas tareas de los drones civiles pueden ser la grabación de imágenes con fines cinematográficos o de vigilancia, la recopilación de datos topográficos, la ayuda en el campo de la agricultura, el transporte de paquetes, la función de salvamento o el despliegue de redes de comunicaciones. En el campo militar las opciones de estos drones se multiplican, puesto que hacen posible una potencial intervención en una determinada zona sin riesgo de exponer la vida de un piloto. También existen críticas al uso militar de drones puesto que existe el riesgo de perder la sensibilidad con el terreno en el que se encuentra el dron y realizar actividades de dudosa ética y legalidad en él [8].



Figura 2.4 Drones trabajando en el campo agrónomo y militar [6], [7]

### 2.1.3. Sistema aéreo no tripulado.



Figura 2.5 Esquema de los sistemas que forman un SUAS [9]



Un sistema aéreo no tripulado o UAS (*Unmanned Aerial System*) se compone de diferentes módulos que hacen posible la funcionalidad total del sistema. Éstos son el propio UAV, el GCS (*Ground Control Station*) o Estación de Control en Tierra, el GPS, y el software o herramientas adicionales para su uso y mantenimiento. Más adelante se detallan las funcionalidades de cada módulo.

El proyecto actual pretende desarrollar un sUAS (*small UAS*) o pequeño UAS para aprovechar las ventajas que ofrecen este tipo de sistemas, capaces de desplegar su funcionamiento en casi cualquier lugar geográfico sin necesidad de infraestructura adicional alguna como pudieran ser aeropuertos o helipuertos.

## 2.2. Marco regulador.

Actualmente en España, como en el resto de los países del mundo, la tecnología evoluciona a un ritmo bastante mayor que la legislación que debe acotar y delimitar su uso para prevenir accidentes y proteger a sus ciudadanos de episodios indeseados.

En lo relativo a los drones no podía ser diferente y las leyes cambian a medida que se van introduciendo nuevos problemas o las tecnologías consiguen avanzar en un campo en el que antes no existía investigación alguna. Es por eso por lo que la última ley que existía para regularizar el uso de drones ha sido actualizada tan solo 3 años después de haber sido aprobada. Por tanto, el Real Decreto 1036/2017 [10] modifica el Real Decreto 552/2014 [11] que existía anteriormente. Esta última ley ha entrado en vigor el 30 de diciembre de 2017 y pretende regular aún mejor el uso de los drones en el espacio aéreo español.



Figura 2.6 Imagen representativa de la nueva ley de drones [12]

Se van a mencionar únicamente los puntos que afectan al sistema que se va a desarrollar, dejando de lado regulaciones existentes para otros drones que tengan otras características u otros que no sean del interés del actual proyecto.

El Real Decreto regula “a las aeronaves civiles pilotadas por control remoto (RPA) cuya masa máxima al despegue sea inferior a los 150 kg” [10]. El sistema en desarrollo cumplirá con esto y por lo tanto estará sujeto a ello.

El Artículo 4 “Requisitos generales de uso de las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA).” [10] menciona que “el uso de aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) requerirá, en todo caso que su diseño y características permitan al piloto intervenir en el control del vuelo, en todo momento” [10]. Este apartado limita el radio de acción del dron en su periodo de pruebas, ya que no es legal perder el control manual del dron en ningún momento. Según el Artículo 8 la identificación del dron es obligatoria y “deberán llevar fijada a su estructura una placa de identificación ignífuga” [10]. Por el contrario, el sistema desarrollado en este proyecto no necesitará matriculación ni certificado de aeronavegabilidad puesto que en el Artículo 9 “las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) con una masa máxima al despegue que no exceda de 25 kg quedan exceptuadas de los requisitos de inscripción en el Registro de Matrícula de Aeronaves Civiles y de la obtención del certificado de aeronavegabilidad previstos” [10]. Ya en el Capítulo III del Real Decreto se tratan las “Condiciones para la utilización del espacio aéreo” [10]. Este apartado debe resaltarse sobre todos los demás, siendo la seguridad en el vuelo el principal factor a tener en cuenta. El Artículo 21 trata las “Condiciones de utilización del espacio aéreo para la realización de operaciones aéreas especializadas por aeronaves pilotadas por control remoto que no dispongan de certificado de aeronavegabilidad” [10]. Aquí se introduce una gran novedad respecto a la ley anterior, que prohibía el vuelo en zonas urbanas [11]. Esta nueva ley declara que “podrán realizarse operaciones aéreas especializadas sobre aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado y fuera de una zona de información de vuelo (FIZ), únicamente por aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) cuya masa máxima al despegue no exceda de 10 kg, dentro del alcance visual del piloto (VLOS), a una distancia horizontal máxima del piloto de 100 m, y a una altura máxima sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m), o sobre el obstáculo más alto situado dentro de un radio de 600 m desde la aeronave.” [10]. Esta novedad aumenta las posibilidades de vuelo respecto a la ley anterior [11]. Si se desea aumentar el radio de acción, se debe recurrir a zonas no urbanas, reguladas ya anteriormente, ofreciendo la posibilidad de que el dron pueda moverse en un área en el que se pueda controlar visualmente, con la posibilidad de incorporar observadores para que comuniquen en tiempo real la posición del dron al piloto y éste sea capaz de manejarlo. Este proyecto se va a limitar a controlar el dron mediante la simple observación del piloto, si contar con observadores externos, puesto que el objetivo es observar la funcionalidad adicional al vuelo, y no solo este.

Una vez que se conoce la regulación actual en España, existen pocas restricciones en lo que respecta al proyecto actual, puesto que no se precisa de ningún permiso que sea imprescindible para el desarrollo de las pruebas en un entorno controlado.

### 2.3. Diseño de soluciones actuales.

El despliegue de drones en el aire para proporcionar servicios en tierra es un campo que se ha venido investigando en los últimos años debido a las innumerables ventajas que presenta. Proporcionar cobertura en lugares con una orografía complicada, una densidad muy baja de población o unas infraestructuras que no permiten el despliegue de redes de comunicaciones es actualmente un campo en el que se invierte mucho capital tanto público como privado.



Figura 2.7 Imagen del sistema desarrollado por DARPA [13]

Los primeros en realizar este tipo de investigaciones fueron los Estados Unidos de América [13]. Más concretamente DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*), dependiente del Departamento de Defensa de Estados Unidos. Esta

organización [14], denominada inicialmente como ARPA, estableció los principios de ARPANET, precursor de la red global actual denominada Internet. El objetivo de este nuevo proyecto era el de proporcionar cobertura a las tropas desplegadas en territorio exterior y combatir así la falta de conectividad en operaciones tácticas y mejorar el acceso a informes de inteligencia. El proyecto de DARPA se hizo público en 2014, una fecha relativamente cercana y que refleja la importancia de estas investigaciones en la actualidad.



Figura 2.8 Dron diseñado por Google [15]

El interés por establecer nuevas redes en lugares en los que hasta ahora no se han desplegado también ha sido interesante para gigantes tecnológicos como Google y Facebook, que se benefician de que exista un potencial tráfico en la red por parte de los núcleos de población que no disponen de medios para acceder a

Internet. Estos se embarcaron en dos proyectos diferentes que tenían como objetivo construir un dron capaz de sobrevolar un área geográfica durante un largo periodo de tiempo y consumiendo energía solar. Google se hizo con Titan Aerospace, empresa que también quiso comprar Facebook, y consiguió construir un dron capaz de volar durante

varios días seguidos sin necesidad de aterrizar [15]. Con la llegada de Alphabet, el proyecto SkyBender fue perdiendo importancia hasta que en enero de 2017 se decidió abandonar. Ahora Google centra sus esfuerzos en el proyecto Loon [16], que conserva el mismo objetivo, pero esta vez pretende llevarse a cabo mediante globos, y no drones, que sobrevuelan las zonas en las que se ofrezca cobertura. Facebook por el contrario siguió con su desarrollo, pero recientemente en junio de 2018, también ha desistido y ha abandonado su proyecto Aquila [17] después de que su prototipo haya sufrido varios percances durante toda su evolución. Facebook sigue apoyando la idea de ofrecer Internet en zonas remotas y argumenta que existen otras compañías aeronáuticas interesadas en el desarrollo de estos drones y que por lo tanto no necesitan seguir invirtiendo capital para desarrollar uno propio.

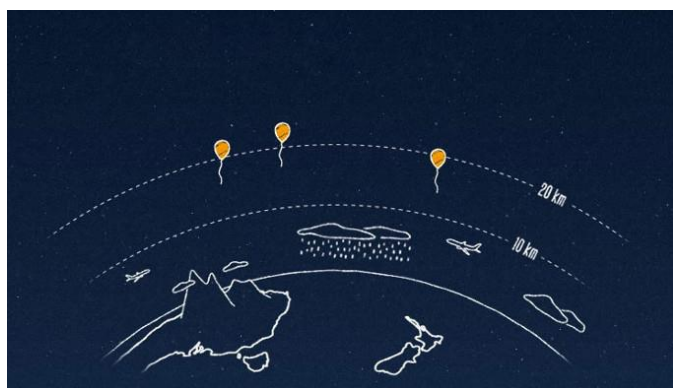


Figura 2.9 Esquema ilustrativo del proyecto Loon de Google [16]

abandonar. Ahora Google centra sus esfuerzos en el proyecto Loon [16], que conserva el mismo objetivo, pero esta vez pretende llevarse a cabo mediante globos, y no drones, que sobrevuelan las zonas en las que se ofrezca cobertura. Facebook por el contrario siguió con su desarrollo, pero recientemente en junio de 2018, también ha desistido y ha abandonado su proyecto Aquila [17] después de que su prototipo haya sufrido varios percances durante toda su evolución. Facebook sigue apoyando la idea de ofrecer Internet en zonas remotas y argumenta que existen otras compañías aeronáuticas interesadas en el desarrollo de estos drones y que por lo tanto no necesitan seguir invirtiendo capital para desarrollar uno propio.



Figura 2.10 Dron desarrollado por Facebook en el proyecto Aquila [17]

En una escala más pequeña, Vodafone también está interesada en el campo de los drones y está inmersa en una investigación para poder controlarlos a través de la red de comunicaciones móviles ya existente [18]. Su objetivo además es poder geolocalizar el dron gracias a su tarjeta SIM, sin necesidad de señal GPS. Aunque la compañía continúa investigando en esa dirección, la normativa en España necesita avanzar para que estas tecnologías lleguen a desarrollarse totalmente. Actualmente la posibilidad de que un dron vuele de forma autónoma más allá de la visión del piloto es totalmente ilegal.

Después de conocer el panorama mundial respecto a las investigaciones más importantes en este campo, es evidente que los intentos por alcanzar una buena solución al problema han sido ejecutados por gigantes tecnológicos de primer nivel. Esto significa que la tecnología investigada es de gran utilidad en el mundo actual y es necesario intentar encontrar soluciones que sean factibles y que puedan ser replicables debido a la gran demanda que tendría la solución propuesta.

### **3. ANÁLISIS GENERAL**

#### **3.1. Análisis de Requisitos.**

El proyecto tiene como objetivo la integración de un ordenador a bordo de un dron y el establecimiento de una base para futuras investigaciones que puedan realizarse sobre ello. En este caso se va a escoger una Raspberry PI como ordenador. Su capacidad de cómputo, soporte de comunicaciones, tamaño y peso son factores que juegan a su favor frente a otras opciones posibles. La Raspberry PI servirá para futuras programaciones que necesiten ser investigadas y probadas en el aire.

El modelo utilizado es una Raspberry PI 3 Model B con las siguientes especificaciones facilitadas por el fabricante [20]:

- Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
- 1GB RAM
- BCM43438 wireless LAN and Bluetooth Low Energy (BLE) on board
- 100 Base Ethernet
- 40-pin extended GPIO
- 4 USB 2 ports
- 4 Pole stereo output and composite video port
- Full size HDMI
- CSI camera port for connecting a Raspberry Pi camera
- DSI display port for connecting a Raspberry Pi touchscreen display
- Micro SD port for loading your operating system and storing data
- Upgraded switched Micro USB power source up to 2.5A

Una vez conocido el ordenador central del dron, es necesario dimensionar las proporciones que debe tener para la correcta implantación de todos los sistemas necesarios. Según el fabricante, la placa de la Raspberry PI 3 Model B es de 85x56x17 milímetros, por lo que se necesita una estructura capaz de integrar esas medidas. La estructura debe adecuarse al diseño de quadcoptero, uno de los más extendidos en el mercado. También es necesario el uso de algún complemento adicional que proporcione acceso a la red 4G a través de la Raspberry y que debe estar acoplado a ésta. Por otra

parte, se precisa también de espacio suficiente para la colocación de un módulo GPS, puesto que es necesario conocer la ubicación del dron en todo momento. Además, el conjunto Batería-Motor-Hélice debe ser capaz de proporcionar una potencia suficientemente alta como para que los movimientos del dron sean ágiles y estables para asegurar la integridad de los sistemas acoplados en él. La batería, por su parte, debe estar asegurada en caso de impacto para evitar así su inflamación o posible explosión con el consecuente daño a los demás sistemas del dron.

### **3.2. Software controlador de vuelo.**

El software controlador de vuelo es el componente más importante en lo que se refiere al control del dron. Está dividido en dos partes diferenciadas de software. Una que se instala en la placa controladora de vuelo o FC (*Flight Controller*) que se encuentra a bordo del dron, y otra que se instala en un ordenador en tierra y que de ahora en adelante se denominará GCS (*Ground Control Station*).

La función del software del FC es la de controlar la estabilidad del dron gracias a la información que recibe de la placa en la que está instalado y responder a los movimientos que en cada momento se requieren, ya sea acelerando o decelerando los motores. También es el encargado de interpretar todos los datos que reciben los sensores del FC, ya sea una señal GPS, una señal del barómetro, del acelerómetro o una tensión de entrada que indica el nivel de batería que le queda al dron. Es evidente que, dependiendo del software escogido, éste soportará determinadas placas FC existentes en el mercado, por lo que se debe elegir cuidadosamente tanto una como otra.

Por otra parte, el software GCS es la parte de configuración y monitorización que se comunica con el FC. Permite modificar las configuraciones establecidas en el dron, incorporar nuevos sistemas en el mismo o visualizar la telemetría instantánea.

Una vez conocidas las características de un software controlador de vuelo, se han valorado varias opciones disponibles en el mercado. Las características que más positivamente han influido en la elección han sido que el proyecto sea Open Source, que tenga una gran comunidad activa para la resolución de problemas que puedan surgir, que sea compatible con el mayor número de placas FC posibles y que la interfaz gráfica del GCS sea intuitiva y a la vez precisa y personalizable. La opción escogida por tanto ha sido el software de dRonin [21]. Se diferencia de los demás existentes en el mercado en que posee una buena interfaz gráfica, es el que posee una comunidad de desarrolladores más activa, cuenta con bastantes opciones de navegación GPS y ofrece una opción de autoconfiguración de la estabilización del dron, cosa que otros controladores no ofrecen y requieren que se desarrolle manualmente. Una vez elegido el software con el que trabajar, el dron no precisa de ningún tipo de software adicional para comenzar a volar.

### 3.3. Componentes necesarios

Las diferentes piezas y componentes necesarios para construir el dron necesitan ser compatibles entre sí y estar integrados de forma que la funcionalidad final sea la deseada. Para ello se realiza un estudio para la elección de las piezas necesarias, previo a la adquisición de las mismas. Los componentes detallados en esta sección son los principales a tener en cuenta. A pesar de ello, se incluirán algunos más que sean necesarios en el siguiente capítulo en el que se detalla la construcción del dron.

#### 3.3.1. Placa FC

La placa, *Flight Controller* o FC es la encargada de ejecutar el software de vuelo, mantener la estabilidad del dron y realizar las maniobras que se deseen. Controla todos los periféricos de vuelo que se le añaden al dron y por tanto es una pieza sensible en el diseño de este. Los requisitos mínimos exigibles son la capacidad de incorporar un receptor radio, un módulo GPS y un módulo ADC capaz de detectar un voltaje y así medir el estado de una batería. Se omiten otros sensores como barómetro o brújula ya que se presupone que son esenciales para el buen funcionamiento del sistema y deben ir incluidos en la placa.

El software elegido, dRonin, ofrece distintas recomendaciones de FC con los que es compatible. Dentro de las opciones disponibles se elige el FC CC3D Revolution debido a su capacidad para utilizar todos los modos disponibles de GPS, su integración de dos sensores a parte del giroscopio y acelerómetro, como son un magnetómetro y un sensor de presión, y el cumplimiento de los requisitos anteriormente mencionados.

#### 3.3.2. Motores y hélices

Para que el vuelo del dron sea efectivo se necesita aplicar una fuerza mayor de la que ejerce el propio peso del dron. Para eso se cuenta con cuatro motores y sus respectivas hélices, que aportan la fuerza necesaria como para elevar el dron y controlarlo adecuadamente. Para empezar, hay que estudiar cómo se realiza el giro en cada uno de los cuatro motores y por tanto cómo deben ser las hélices de cada motor.

Al tener cuatro motores, es evidente que dos de ellos girarán en sentido opuesto a los otros dos para compensar el torque que ejerce cada motor y mantener así el dron estable. Por tanto, los motores opuestos giran en el mismo sentido. Al girar algunos en sentidos opuestos, las hélices también deberán ser diferentes en los motores con la finalidad de que todas ellas empujen el aire que las rodea hacia abajo.

Los motores eléctricos que se utilizan en la actualidad han evolucionado respecto a los que tenían escobillas, puesto que ahora no se realiza ningún contacto mecánico para cambiar el campo magnético dentro de un motor eléctrico. Esto reduce vibraciones en el motor, además de desgaste y mantenimiento del mismo. Estos motores son los denominados motores sin escobillas o *brushless* [22].

Una vez que se conoce el tipo de motor que se va a instalar, es necesario determinar qué características debe tener. El proyecto actual precisa de un dron estable, poniendo en segundo plano los movimientos acrobáticos propios de los drones de carreras. Por lo tanto, es necesario realizar el desarrollo con un motor que ofrezca unas bajas revoluciones por minuto y en consecuencia elegir una hélice lo suficientemente grande para obtener esa estabilidad deseada.

El motor escogido ha sido el motor BLDC A2212/13T cuyos datos técnicos proporcionados por el fabricante se muestran a continuación:

Tabla 3.1 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BLDC A2212/13T [23]

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| No. of Cells           | 2 - 3 Li-Poly                 |
| Kv                     | 1000 RPM/V                    |
| Max Efficiency         | 80%                           |
| Max Efficiency Current | 4 - 10A (>75%)                |
| No Load Current        | 0.5A @10V                     |
| Resistance             | 0.090 ohms                    |
| Max Current            | 13A                           |
| Max Watts              | 150W                          |
| Weight                 | 52.7 g                        |
| Size                   | 28 mm dia x 28 mm bell length |
| Shaft Diameter         | 3.2 mm                        |
| Poles                  | 14                            |
| Model Weight           | 300 - 800g                    |

Para visualizar mejor el comportamiento de este motor, se adjunta un gráfico con su rendimiento en función de la corriente ofrecida. En amarillo para una tensión de 11.1V y en azul para una tensión de 7.2V.



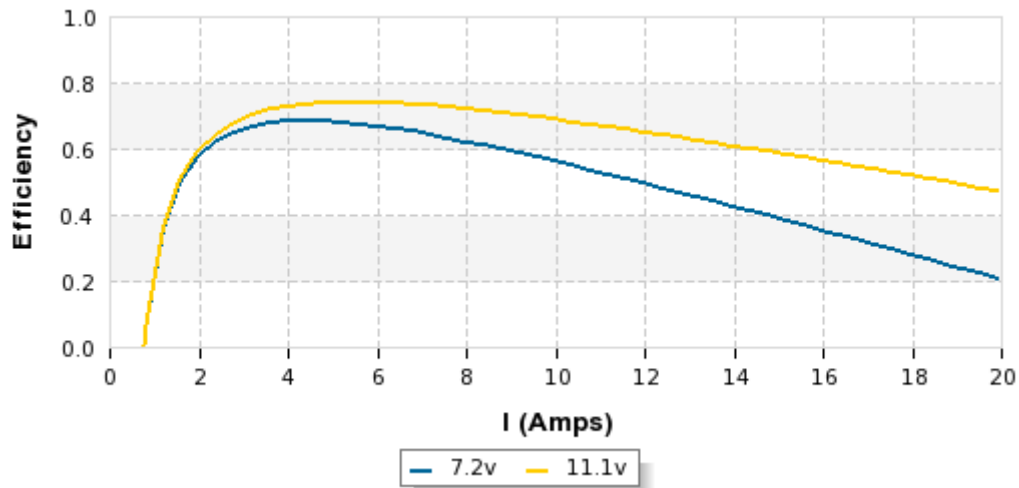


Figura 3.1 Curva de eficiencia del motor BLDC A2212/13T [23]

Para continuar con el análisis, es necesario escoger las hélices apropiadas para este motor. El fabricante recomienda utilizar hélices de 10x5 con la alimentación de una batería de 3 celdas [23]. Ofrece también una tabla en la que se puede observar los rendimientos que ofrecen distintas hélices en este motor.

Tabla 3.2 RENDIMIENTOS DE HÉLICES EN MOTOR BLDC A2212/13T [24]

| Propeller  | Gear Ratio | Volts | Amps | Watts | RPM  | Speed (mph) | Thrust (g) | RPM % of Kv*V | as of |
|------------|------------|-------|------|-------|------|-------------|------------|---------------|-------|
| GWS HD 8x4 | 1          | 7     | 3.35 | 23    | 6630 | 25.1        | 226        | 88%           |       |
| GWS HD 8x4 | 1          | 7.9   | 4.1  | 32    | 7410 | 28.1        | 287        | 87%           |       |
| GWS HD 8x4 | 1          | 8.9   | 4.85 | 43    | 8220 | 31.1        | 347        | 86%           |       |
| GWS HD 8x4 | 1          | 9.9   | 5.65 | 55    | 8940 | 33.9        | 420        | 84%           |       |
| GWS HD 8x4 | 1          | 10.9  | 6.5  | 70    | 9660 | 36.6        | 495        | 82%           |       |
| GWS HD 9x5 | 1          | 6.9   | 5.5  | 37    | 6000 | 28.4        | 348        | 81%           |       |
| GWS HD 9x5 | 1          | 7.9   | 6.7  | 52    | 6660 | 31.5        | 436        | 78%           |       |
| GWS HD 9x5 | 1          | 8.9   | 7.85 | 69    | 7290 | 34.5        | 526        | 76%           |       |
| GWS HD 9x5 | 1          | 9.9   | 9.25 | 91    | 7920 | 37.5        | 627        | 74%           |       |
| APC E 10x5 | 1          | 6.9   | 7    | 48    | 5610 | 26.6        | 406        | 75%           |       |

| Propeller   | Gear Ratio | Volts | Amps  | Watts | RPM  | Speed (mph) | Thrust (g) | RPM %<br>Kv*V | as of |
|-------------|------------|-------|-------|-------|------|-------------|------------|---------------|-------|
| APC E 10x5  | 1          | 7.9   | 8.45  | 66    | 6120 | 29.0        | 505        | 72%           |       |
| APC E 10x5  | 1          | 8.9   | 9.9   | 88    | 6690 | 31.7        | 604        | 70%           |       |
| APC E 10x5  | 1          | 9.9   | 11.45 | 113   | 7170 | 34.0        | 702        | 67%           |       |
| APC E 10x5  | 1          | 10.9  | 13    | 141   | 7650 | 36.2        | 802        | 65%           |       |
| GWS HD 10x6 | 1          | 6.9   | 7.2   | 49    | 5610 | 31.9        | 424        | 75%           |       |
| GWS HD 10x6 | 1          | 7.9   | 8.7   | 68    | 6180 | 35.1        | 526        | 72%           |       |
| GWS HD 10x6 | 1          | 8.9   | 10.1  | 89    | 6690 | 38.0        | 617        | 70%           |       |
| GWS HD 10x6 | 1          | 9.9   | 11.7  | 115   | 7200 | 40.9        | 722        | 67%           |       |
| GWS HD 10x6 | 1          | 10.9  | 13.25 | 144   | 7680 | 43.6        | 817        | 65%           |       |
| GWS HD 10x8 | 1          | 10.8  | 18.2  | 196   | 6390 | 48.4        | 733        | 55%           |       |

La tabla proporciona información muy útil a la hora de escoger las hélices. Las de 8x4 y 9x5 se quedan un tanto cortas en potencia, pues el empuje máximo sería de 495 y 627 gramos por motor, respectivamente. La de 10x8 también es descartada puesto que consume demasiado para un empuje pobre. La decisión por lo tanto se encuentra entre las hélices 10x5 y 10x6. Se eligen las 10x5 por ser las recomendadas por el fabricante, puesto que las características respecto a las de 10x6 son muy similares.

Según los motores escogidos, el tipo de hélices y atendiendo a los datos proporcionados por las tablas anteriores, si los motores son alimentados con una tensión de 10.9 voltios y una corriente de 13 amperios, el dron tendrá un empuje teórico hacia arriba de 802 gramos en cada motor. Esto multiplicado por los cuatro motores resulta en un empuje de 3.208 gramos. Esta cifra se valora como más que suficiente para realizar el desarrollo del dron puesto que no se estima que éste sobrepase los 2kg de peso.

### 3.3.3. ESC

Los ESC (*Electronic Speed Controllers*) o variadores de velocidad son los encargados de variar la potencia que se entrega a cada motor y por tanto su velocidad de giro. Por una parte, están conectados a los tres cables del motor para poder entregar la potencia necesaria y que éste funcione. Por otra, están directamente conectados a la batería del

dron, desde donde obtienen la energía necesaria para entregársela al motor. Por último, cuentan con otros dos cables empleados en recibir la señal correspondiente de la placa FC y así determinar la velocidad a la que debe girar el motor. Algunos ESC tienen un cable adicional a estos dos últimos. Es el llamado BEC (*Battery Elimination Circuit*) que no es más que un simple regulador de voltaje con una salida de 5 voltios. Como su propio nombre indica, permite eliminar un circuito regulador de voltaje junto a la batería, puesto que los 5 voltios necesarios para alimentar la placa FC ya son proporcionados por él mismo.

La elección de los ESC debe tener en cuenta la corriente máxima soportada por el motor sobre el que va a ejercer el control y establecer una ventana de seguridad sobre ésta. La principal característica de los ESC son la intensidad que soportan. Si se observan las especificaciones del motor utilizado, éste admite un máximo de 13 amperios. Aunque este valor esté especificado como un máximo, el motor puede ser capaz de solicitar más potencia en momentos puntuales y sobrepasar de forma holgada este valor. Por tanto, un ESC capaz de soportar 30 amperios es la elección ideal para esta configuración. Hay que destacar también que es deseable que el ESC elegido tenga el correspondiente cable BEC para ahorrar espacio en la estructura del dron.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se ha escogido el ESC Simon-30A. Las especificaciones del fabricante [25] muestran una corriente máxima soportada de 30 amperios, una corriente de incendio de 40 amperios, una batería soportada de 2-3 celdas y una salida en el cable BEC de 5 voltios y 2 amperios.

#### **3.3.4. Emisora y Receptor**

La emisora y el receptor son los componentes que establecen el enlace radio entre el dron y el piloto que lo maneja. La emisora debe estar vinculada con el receptor y éste último conectado al FC para poder transmitir las órdenes que salen de la emisora. Las opciones en este aspecto son muy variadas, sobre todo en el plano económico. La emisora y el receptor suelen venir en el mismo paquete, aunque existe la posibilidad de adquirirlos de manera separada si éstos son compatibles. El rango de precios oscila entre los 20 euros y los 2.000 euros en la mayoría de los casos. Para este proyecto se precisa de un emisor sencillo pero que haga posible el cambio de algunos parámetros de configuración. Estudiando las ofertas presentes, se ha elegido el Turnigy TGY-i6, que viene junto a su receptor Turnigy TGY-ia6. Este modelo adquirido permite la comunicación mediante seis canales y utiliza el siguiente rango de frecuencias: 2.405-2.475Ghz. Cuatro de los seis canales se utilizan para controlar los movimientos del dron, quedando dos restantes para el cambio de los modos de vuelo u otras funcionalidades adicionales. La emisora cuenta con una pantalla en la que se muestran opciones como la configuración de canales, la curva de ganancia de cada uno o el dron que se ha elegido para manejar en ese momento, ya que dispone de memoria para guardar hasta 20 configuraciones de drones diferentes. El receptor, por su parte, se limita a recibir la señal emitida por la emisora gracias a sus dos antenas de 26 milímetros.

### **3.3.5. Módulo GPS**

El módulo GPS es un complemento adicional que no es necesario para que el dron vuele pero que ofrece unas funcionalidades que se aprovechan en beneficio del sistema en general. Varios modos de vuelo utilizan la localización GPS en sus configuraciones y es una herramienta muy útil que permite, por ejemplo, estabilizar el dron en un punto geográfico determinado sin necesidad de estar pilotándolo manualmente.

En la construcción del dron se ha elegido el GPS NEO-M8N, desarrollado por la marca dominante en el sector de los GPS en drones, Ublox. El GPS elegido cuenta con unos conectores que no son compatibles con la placa FC que hemos escogido, por lo que hay que cambiarlos y colocar los conectores correspondientes. Este trabajo se realiza en el apartado de construcción del dron. Por último, resaltar que este módulo es compatible tanto con la señal recibida por el sistema estadounidense GPS como por el sistema europeo Galileo.

### **3.3.6. Raspberry PI**

La Raspberry PI es el elemento que se desea transportar en el dron con el objetivo de brindar la posibilidad de ejecutar cualquier tipo de programa o instrucción en el lugar geográfico en el que éste se encuentre en ese instante. Por ello, es el ordenador central del dron y por el que pasan todos los intercambios de datos.

El modelo que se utiliza en el proyecto es Raspberry PI 3 Model B, como ya se ha descrito anteriormente en el apartado de requisitos. Esta placa tiene las funciones de un ordenador que se encuentra en el aire y que puede realizar las operaciones que se le soliciten. Para que esta funcione debe proporcionarse una tarjeta microSD, en este caso una SanDisk de 16GB.

### **3.3.7. Estructura y brazos del dron**

La estructura del dron es la base sobre la que se van a integrar el resto de los componentes y la que va a soportar todo el peso del dron. Por ello conviene que sea una estructura sólida y fiable que tenga la posibilidad de acoplar los distintos componentes que se han descrito. En la parte central del dron, los componentes que más espacio consumen son la Raspberry y la batería, por lo que se han tenido en cuenta sus dimensiones y valorado las distintas estructuras en torno a ello. Se ha elegido por tanto la estructura Dji 450 que además ofrece la posibilidad de utilizar la base de la estructura como PDB (*Power Distribution Board*). Esto hace posible la distribución del voltaje de la batería en distintos puntos de la placa, los cuales serán utilizados para soldar los cables que proporcionan la tensión a los ESC.

### **3.3.8. Fuentes de energía**

La fuente de energía es el componente que permite ofrecer la potencia necesaria a los motores y a los demás componentes del dron. El principal gasto se centra en el consumo de la Raspberry y de los cuatro motores. Existen dos posibilidades para alimentar el dron. La primera es escoger una batería central que alimente tanto a los sistemas relacionados con el vuelo del dron (motores, FC, ESC, GPS, etc.) como a la Raspberry y sus futuros complementos. La segunda es integrar dos baterías; una para los sistemas de vuelo y otra para los de la Raspberry. Por motivos de seguridad y de autonomía, se ha escogido la segunda opción. La opción de integrar dos baterías evita que las actividades de cómputo afecten a la autonomía de vuelo. En este caso, por ejemplo, el dron podría realizar un aterrizaje y continuar ofreciendo su servicio sin necesidad de utilizar la batería encargada del vuelo.

La batería escogida para los sistemas de vuelo es una batería Li-Po de 5000 mAh, 3 celdas y tiene una tasa máxima de descarga de 20C-30C, lo que quiere decir que puede llegar a ofrecer hasta 100-150 amperios. Los motores, principal fuente de consumo de esta batería, tienen un consumo máximo teórico de 52 amperios entre los cuatro. Por tanto, la batería puede ofrecer potencia suficiente para mover los motores. Ofrece una tensión de 12 voltios aproximadamente y necesita ser cargada mediante carga balanceada para el buen mantenimiento de esta. La carga se explica más adelante en el apartado dedicado a su cargador.

La otra batería escogida, encargada de los sistemas dependientes de la Raspberry, es una batería de 5200 mAh que ofrece un máximo de 5 voltios y 2.1 amperios a su salida. Una consideración que realizar es que, si el vuelo comienza con las dos baterías cargadas, es de esperar que la encargada del vuelo se agote primero y por lo tanto aún se tenga control sobre el ordenador que se sitúa sobre el dron, puesto que está alimentado con esta otra batería. Esto es más ventajoso que si ocurre lo contrario. Si la batería de la Raspberry se agota antes que la de vuelo, la monitorización sobre este último se pierde. En cualquier caso, ninguna de las dos baterías debe llegar a agotarse, pues esto reduce su vida útil.

### **3.3.9. Cargadores de las fuentes**

Las dos baterías del sistema necesitan recargarse cuando su voltaje así lo indique. La batería de la Raspberry puede ser cargada normalmente mediante USB. En cambio, la batería responsable del vuelo necesita ser cargada de forma especial.

Las baterías Li-Po cuentan con un determinado número de celdas que viene indicado en las instrucciones del fabricante o en el recubrimiento de las mismas. En este caso la batería posee 3 celdas de carga. Esto quiere decir que en su interior existen 3 compartimentos de carga situados en serie. El voltaje de una celda cargada se sitúa en 4.2 voltios y en su descarga no debe bajar de 3.5 voltios. Por lo tanto, estas baterías ofrecen una media de 12 voltios entre sus bornes. Estas baterías poseen dos conectores, uno con dos cables que proporciona la tensión total de la batería, y otro con las tensiones de cada

celda de la batería. En el caso de esta batería de 3 celdas, el segundo conector tendrá cuatro cables para poder comprobar las tensiones individualmente.

La recomendación para cargar este tipo de baterías y alargar así su vida útil es realizar una carga balanceada. Esto quiere decir que la carga se realiza por separado en cada una de las celdas y debe ir aumentándose al mismo ritmo que las demás, obteniendo el mismo voltaje (4.2V) en cada una al concluir la operación. Si la carga de la batería no se realiza de este modo puede llegar a explotar si alguna celda está defectuosa.

Para realizar la carga balanceada se necesita un cargador especializado en estas baterías. Existen cargadores que ofrecen diferentes modos de carga, con pantallas que permiten personalizar estas cargas y monitorizar el estado de la batería. Ya que en este proyecto se va a realizar solo un tipo de carga, se ha escogido un cargador específico para baterías de dos y tres celdas, el E3 SKYRC, sin llegar por lo tanto a las últimas tecnologías en este campo.

### **3.4. Herramientas de desarrollo, construcción y mantenimiento.**

Las herramientas básicas que se precisan para la construcción y configuración del dron son las que se describen en este apartado. Se consideran aquí elementos de software, de hardware y herramientas para el montaje sin entrar en consideración de la configuración de la Raspberry PI que se describe en apartados posteriores de la memoria.

#### **3.4.1. Relacionadas con el software**

Para empezar a descubrir las herramientas software que se necesitan, es imprescindible un equipo u ordenador donde instalarlo. En este caso se va a utilizar un ordenador Toshiba Satellite Pro de gama media con un procesador Intel Core i3-3110M que tiene instalado el sistema operativo de Microsoft Windows 8.1.

El software necesario en este caso es el proporcionado por dRonin. El GCS es por lo tanto la herramienta esencial de software que se va a utilizar para configurar el FC integrado en el dron y verificar el correcto funcionamiento de todos los sistemas añadidos en él.

#### **3.4.2. Relacionadas con el montaje**

El montaje del dron requiere varias herramientas necesarias para integrar todos los componentes y que se comuniquen de manera adecuada entre ellos.

En primer lugar, se necesita un soldador de estaño diseñado para componentes electrónicos. Es el encargado de establecer todas las conexiones físicas entre los cables de los diferentes componentes. El soldador elegido tiene una potencia de 40W. También es necesario estaño como material empleado en la soldadura. Como elemento adicional y para facilitar la función de soldado, se ha optado por una tercera mano con lupa, cuyo objetivo es proporcionar una ayuda en el momento de soldar al sujetar los dos extremos de los cables.

Además de los elementos de unión para los cables y conectores, es necesaria una herramienta de comprobación y medición de los circuitos eléctricos para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. Se ha optado por utilizar un multímetro digital, capaz de comprobar el estado de los circuitos del dron.

Por último, son necesarios también unos alicates y un destornillador, elementos fundamentales a la hora de construir el dron.

## 4. DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL QUADCOPTERO

### 4.1. Instalación del software dRonin

El software de dRonin, como ya se ha indicado anteriormente, es Open Source y por tanto de código abierto. Está disponible para su descarga en dispositivos Windows, Linux y Mac en la página web de dRonin [21]. En este proyecto se ha descargado y utilizado la versión denominada “Wired”, con fecha de lanzamiento 12-2-2018, para un sistema operativo Windows.

#### 4.1.1. GCS

La GCS (*Ground Control Station*) es el software que queda instalado en el ordenador. En primer lugar, se descarga la aplicación desde la página de dRonin [21]. Se procede con la instalación y la GCS ya estará disponible en el ordenador. Este es el centro de configuración del dron y representa la estación de control en tierra. Tiene distintas vistas personalizables e intercambiables para poder ofrecer la visión deseada en cada momento. El GCS viene con cuatro vistas por defecto: *Fligh Data*, *Configuration*, *System* y *Firmware*, además de la vista de *Bienvenida* desde la que se puede acceder a todas estas. Además, también se pueden crear nuevos espacios de trabajo o vistas, con el fin de personalizar el GCS dependiendo del propósito.

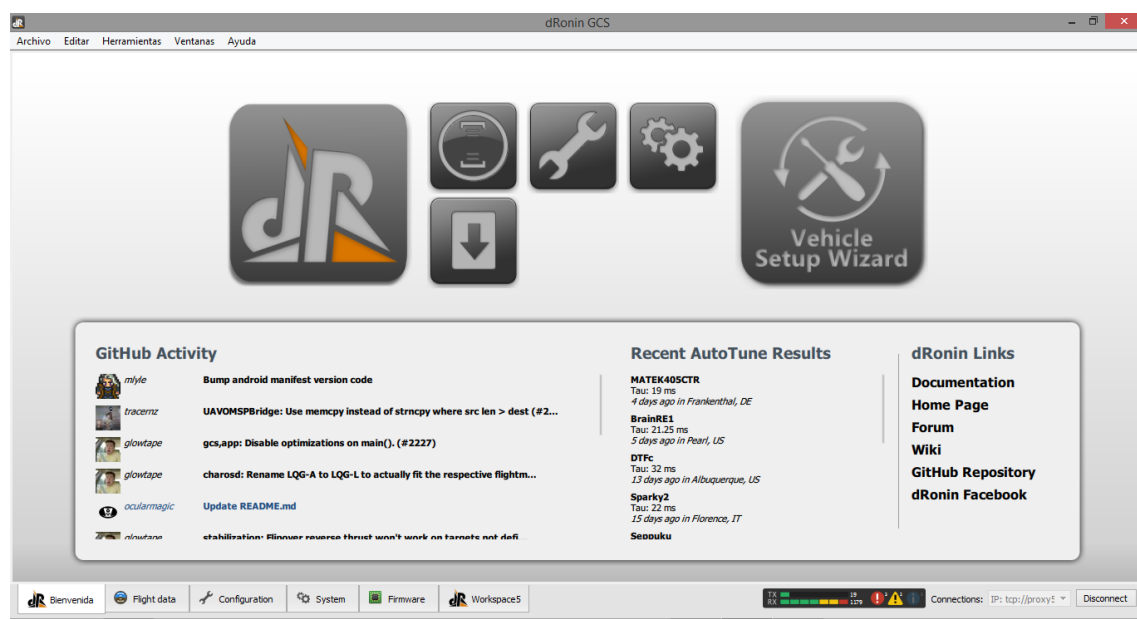


Figura 4.1 Pantalla de Bienvenida del GCS

#### 4.1.2. FC software

El FC también necesita el software de dRonin para poder interactuar con la GCS. Para ello se conecta la placa mediante USB al ordenador e inmediatamente es detectada por el GCS. Este señala que el software del FC no corresponde a una versión de dRonin, pues



pertenece a OpenPilot. Por tanto, se selecciona la opción *Flash* y se indica la placa correcta, en este caso *CC3D Revolution*. Después de esto y una vez instalado el software necesario en el FC, es necesario reiniciarlo simplemente desconectando y volviéndolo a conectar por USB. Si todo ha ido correctamente ahora el GCS y el FC tienen software dRonin. Todo el proceso se realiza en la pantalla de *Firmware* y, por lo tanto, esta queda como se muestra en la imagen.

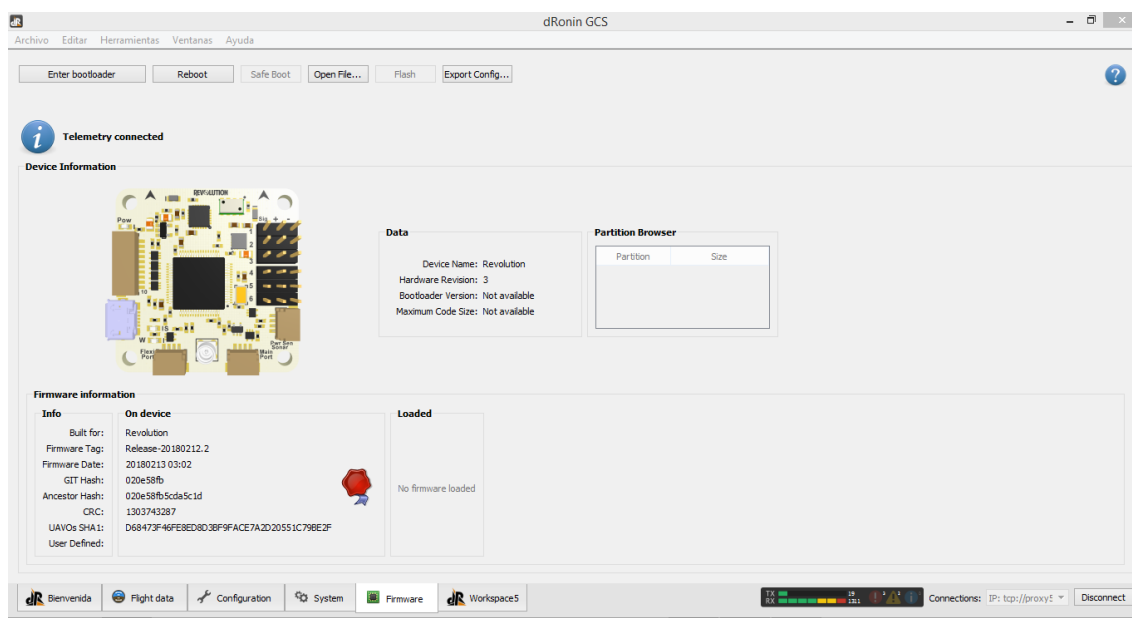


Figura 4.2 Pantalla de Firmware del GCS

## 4.2. Soldadura de la PDB

La PDB o *Power Distribution Board*, como ya se ha apuntado anteriormente, está integrada en la base de la estructura del dron. Su función es proporcionar diferentes tomas de una tensión en la placa y evitar así circuitos adicionales. Si en la placa se insertan 12 voltios, existirán cuatro tomas más que proporcionarán esta tensión. La base por lo tanto tiene cinco tomas con signo positivo y otras cinco con signo negativo. Una se utiliza para insertar el voltaje presente en la batería del dron y las otras cuatro se usan para conectar cada uno de los ESC al mismo voltaje proporcionado por la batería.

Cabe destacar que el trabajo de soldadura que se realiza en este apartado es de vital importancia, pues son los puntos de soldadura que más intensidad de corriente van a soportar a lo largo de todos los circuitos del dron. Es imprescindible por tanto que las soldaduras se realicen correctamente y que queden sólidas y fuertes.

La placa tiene 5 tomas de tensión: una en un lateral y las otras cuatro en las esquinas donde se sitúan los brazos del dron. A la toma del lateral deben ir soldados dos cables de sección 12AWG (2.05mm de diámetro o 3.31mm cuadrados de sección) con terminación en un conector XT60 macho para conectarlo al XT60 hembra que posee la batería. Las otras cuatro tomas irán directamente soldadas a los cables que proporcionan tensión a los cuatro ESC. Los cables rojos serán de signo positivo y los negros de signo negativo.

Una vez realizadas las soldaduras, se comprueba la validez de éstas con el multímetro. Se puede comprobar seleccionando la opción de continuidad, y el multímetro emitirá un pitido si hay continuidad entre los bornes que se elijan. Si se coloca entre dos cables del mismo color, el multímetro debe pitar. Si esto no ocurre es que alguna soldadura ha fallado.

Con todas las soldaduras correctamente ejecutadas y visiblemente robustas, se procede a cubrirlas con cinta aislante negra para que los componentes que se coloquen cerca no puedan tener un posible contacto con éstas y pueda producirse un cortocircuito. Hay que tener en cuenta que un cortocircuito entre dos de esas soldaduras puede llegar a ser peligroso, puesto que la batería ofrece 12 voltios y más de 100 amperios de corriente. Destacar también que para este trabajo de soldadura no se necesita en ningún momento la batería, puesto que, si ésta funciona correctamente y las comprobaciones en la PDB son exitosas, el circuito funcionará.

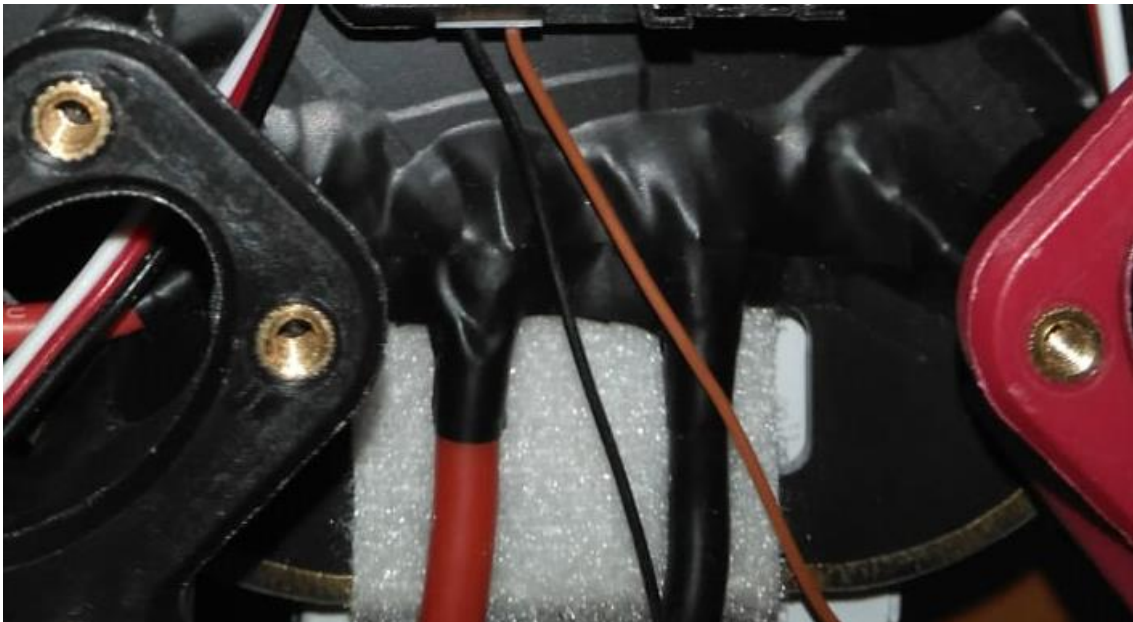


Figura 4.3 Muestra de la soldadura en la PDB

#### **4.3. Integración de FC y receptor**

El FC debe poder comunicarse con cualquier componente que esté integrado en el dron y por tanto es el centro de la arquitectura. Debe estar situado justo en el centro de los cuatro motores y orientado correctamente, con la flecha dibujada en él mirando hacia la parte delantera del dron. Si se realizan dos líneas desde los motores simulando una equis, el FC debe encontrarse en el punto en el que se crucen. Esto hace posible una detección óptima de los movimientos del dron, capturados por los sensores del FC. Para conseguir una disminución de las vibraciones en el FC, se considera la utilización de cinta adhesiva gruesa de doble cara para la sujeción del FC a la base del dron y evitar así estas vibraciones producidas en el vuelo por el giro de los motores. Finalmente se opta por elegir velcro adhesivo para su sujeción puesto que así se facilita un posible trabajo de mantenimiento si en alguna ocasión se pretende extraer el FC del dron.

La siguiente figura muestra un esquema de la distribución de los puertos del FC, sobre la que se va a trabajar para explicar las conexiones realizadas.

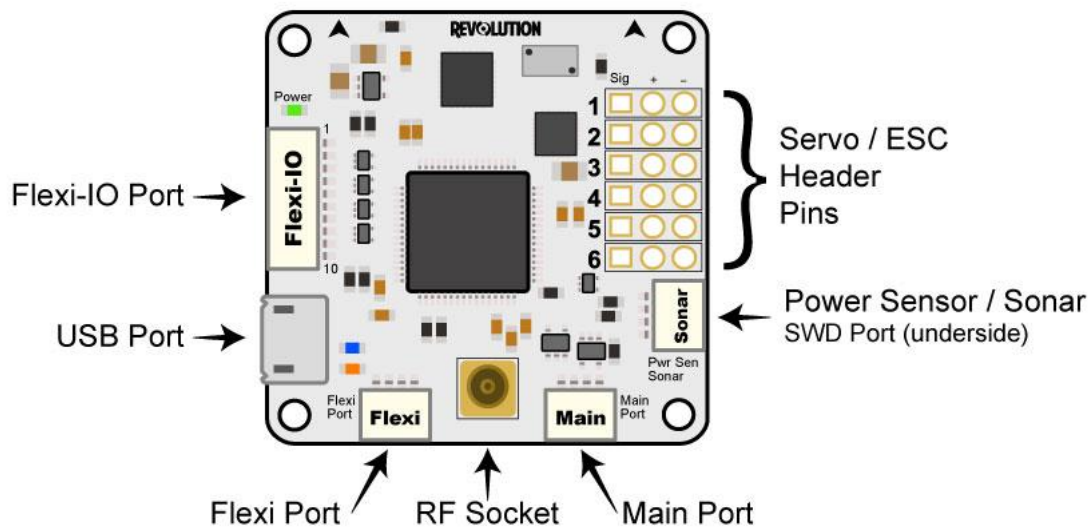


Figura 4.4 Puertos del FC CC3D Revolution [26]

En primer lugar, es necesario tener en cuenta la alimentación de la placa FC para que ésta funcione. Se alimenta proporcionando 5V entre los pines positivo y negativo situados en la parte derecha (Servo/ESC). Como se puede observar, esta placa FC tiene capacidad para controlar hasta 6 salidas. En este caso se utilizan 4 para los motores. Cada una de ellas tiene un pin dedicado a la propia señal de salida, otro pin con la polaridad positiva de la alimentación de 5V y otro con la negativa. Hay que destacar que toda la línea vertical de pines positivos, así como la de negativos, está conectada y por tanto es suficiente con aplicar tensión en una línea de salida para que ésta exista en las seis.

Hay que conseguir por tanto los 5V para alimentar la placa. Éstos se toman del cable BEC de los ESC explicado anteriormente, que proporciona una tensión de 5V para que sea posible aplicarlos directamente y no tener que obtenerlos a partir de otros circuitos. El conector de los ESC es el apropiado para conectarlo directamente a los 3 pines de cada salida del FC, teniendo precaución de colocar a la izquierda el cable de señal, en medio el positivo (BEC) y a la derecha el negativo.

De los cuatro BEC de los que se dispone, solo uno se va a conectar al FC. Esto no afecta al funcionamiento puesto que la línea de positivos estará completamente alimentada con tan sólo uno de ellos conectado. Por tanto, los otros tres cables BEC de cada uno de los conectores de los ESC se retiran con ayuda de un alfiler, levantando la pestaña central del conector en la que se encuentra anclado. El orden de conexión de los ESC se determina en sentido horario y por tanto el 1 será el ESC noroeste, el 2 el ESC noreste, el 3 el ESC sureste y el 4 el ESC suroeste, tomando como referencia la orientación del FC. La configuración de conexión FC-ESC queda por tanto correctamente explicada.



Figura 4.5 Imagen del FC con los ESC conectados

El siguiente paso es instalar el receptor en la base de la estructura, al igual que el FC. El receptor elegido se coloca en la parte trasera del dron, con sus antenas hacia la parte exterior de este. Tiene una distribución de pines parecida a la anteriormente mencionada en el FC. En cada línea de salida tiene un pin de señal, y otros dos pines, positivo y negativo, para la tensión que alimenta el receptor. El FC y el módulo receptor se conectan a través del puerto Flexi-IO del FC. Los conectores necesarios para su comunicación vienen proporcionados con el paquete del FC *CC3D Revolution*. El conector correspondiente con el puerto Flexi-IO tiene ocho cables. Dos de ellos son para proporcionar alimentación al receptor (cables rojo y negro) y los otros seis corresponden a cada canal. El orden de conexión de los canales es en orden ascendente, empezando a contar desde los cables de alimentación, es decir, el canal 1 será el más cercano a estos cables, y el 6 el más alejado. Una vez localizado cada cable, es hora de conectarlos al receptor. Los cables positivo y negativo, que son los encargados de proporcionar alimentación al módulo receptor, se colocan en los pines central y derecho, respectivamente. Hay una línea en el receptor marcada específicamente como Vcc para que sean introducidos ahí, pero al igual que en los pines del FC, la línea de positivos está conectada y por tanto sería igual de eficaz colocarlos en cualquier canal. Para las conexiones de los canales, cada cable debe ir conectado en su correspondiente línea, marcada como CH1, CH2, etc. Éste debe ir en el pin de señal, marcado como S. Una vez conectados los pines en el receptor y el conector en el puerto Flexi-IO del FC, la comunicación entre ambos módulos puede desarrollarse con éxito.

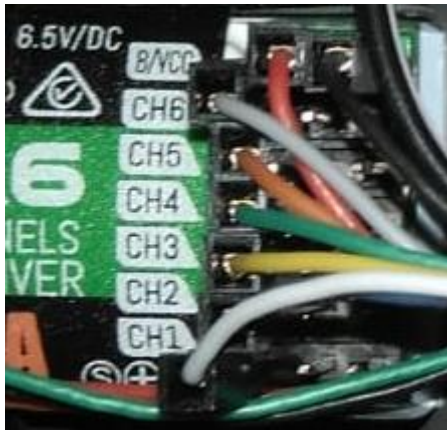


Figura 4.6 Imagen del receptor con sus conexiones

Como resultado de haber adquirido conjuntamente la emisora y el receptor, estos se encuentran ya vinculados y listos para funcionar. En el caso de que por cualquier circunstancia se desvinculen existe un sencillo procedimiento para solventarlo de nuevo. El receptor viene con un puente que se introduce en los pines y conecta el pin de señal con el pin negativo. Se debe colocar el puente en la línea Vcc y alimentar el receptor. Una vez hecho esto, se mantiene pulsado en la emisora el botón de binding y se procede a su encendido. Si todo ha salido bien, la emisora y el receptor están de nuevo vinculados y listos para comunicarse.

#### **4.4. Montaje y conexión de los motores**

Para la conexión de los motores es necesario unir los tres cables de estos con los tres cables de los ESC. Es necesario que los motores giren hacia un sentido determinado. Los motores NW (*NorthWest*) y SE (*SouthEast*) en sentido horario, y los motores NE (*NorthEast*) y SW (*SouthWest*) en sentido antihorario. Para cambiar el sentido de giro de un motor, basta con intercambiar dos de sus tres conexiones. Para facilitar esta operación se decide colocar conectores tipo banana hembra en los ESC y macho en los motores para cambiar rápidamente la polaridad de un motor si es necesario cuando se realicen las pruebas.

Por tanto, antes de colocar los motores en la estructura del dron se procede a realizar el trabajo de soldado con estaño y colocar tres conectores en cada ESC y en cada motor. Una vez soldados todos los componentes, ya sí que se procede a la instalación de los cuatro motores. Estos se acoplan fácilmente a los extremos de los brazos del dron mediante cuatro tornillos. Cabe destacar que los cuatro tornillos que vienen con cada motor no son lo suficientemente largos como para atravesar el espesor de la estructura y sujetar bien el motor, por lo que se han adquirido unos nuevos más largos para hacer posible la correcta sujeción de los motores.

Una vez fijados en la estructura, se conectan con los ESC a la espera de ser probados y elegir su sentido de giro.



## 4.5. Configuración del FC

La configuración del FC se realiza una vez que se han integrado los elementos básicos para poder realizar el primer vuelo. Esta configuración tiene como objetivo calibrar los distintos sistemas integrados en el FC, así como vincular la emisora y el receptor para hacer el vuelo posible.

### 4.5.1. Primeros pasos

Para comenzar la configuración, desde el GCS, es necesario seleccionar la opción *Vehicle Setup Wizard*. Una vez seleccionado, la configuración es guiada por parte del GCS. En este caso se seleccionan las opciones requeridas, dejando a un lado la configuración de motores ya que el software no es capaz de hacerlos girar en esta primera configuración. Se selecciona la placa *CC3D Revolution*, el tipo de señal de entrada (PWM con un cable por cada canal), multirrotor quadcóptero en X y protocolo Oneshot125 en ESC.

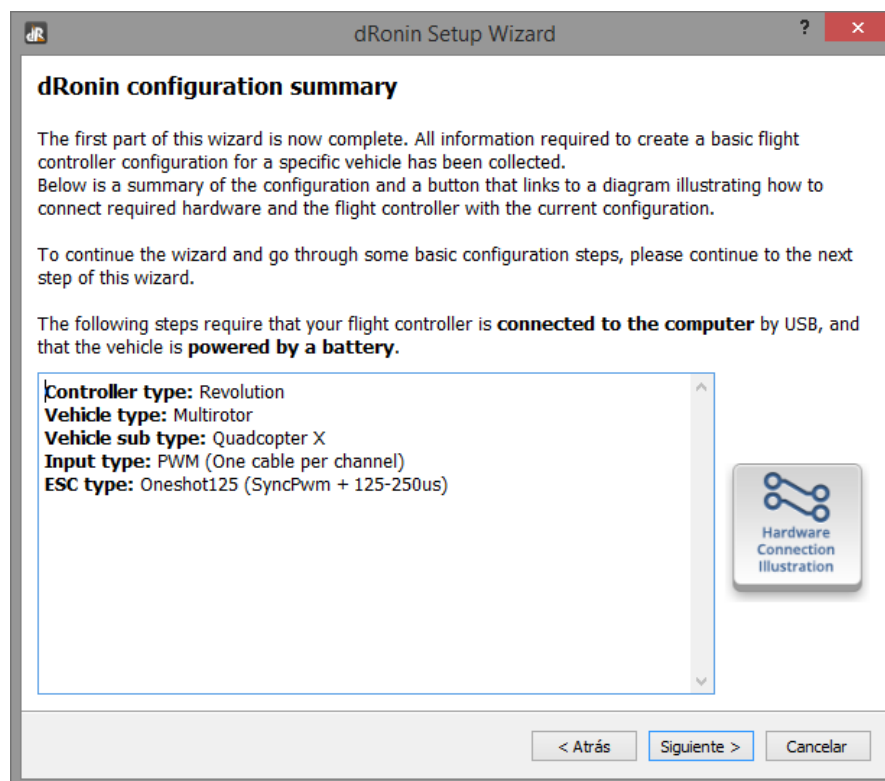


Figura 4.7 Resumen de la configuración inicial del FC

Además de lo anterior, también se realiza una calibración para determinar la horizontalidad del dron y calcular los parámetros correspondientes.

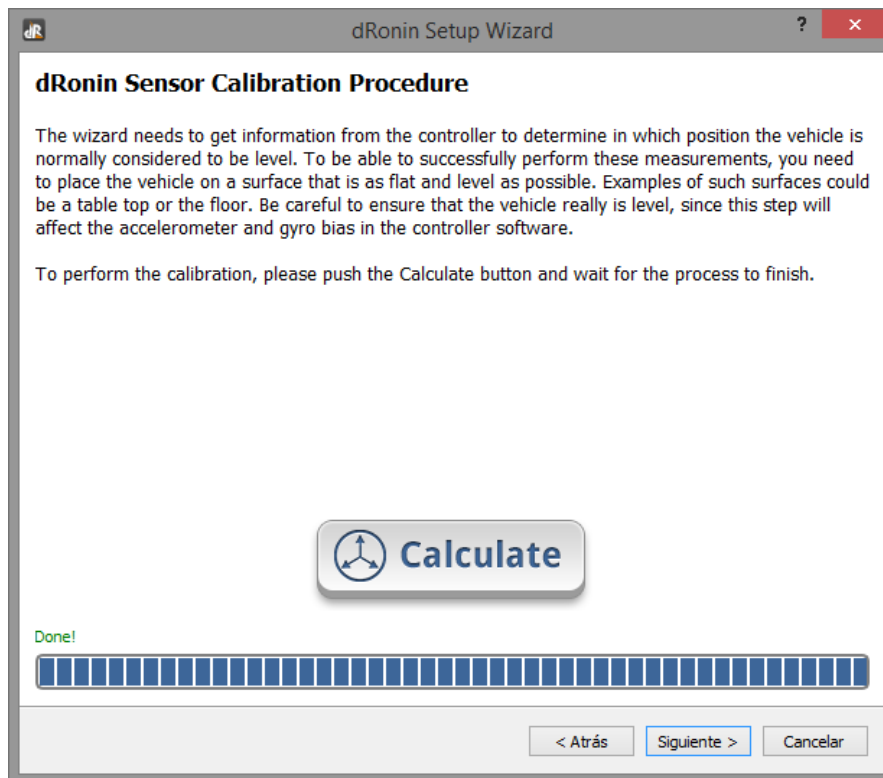


Figura 4.8 Procedimiento de calibrado de sensores

#### 4.5.2. Output

Para realizar la configuración de los motores es necesario, como se ha explicado anteriormente, que estos giren en el sentido adecuado. Para ello, es necesario utilizar el cuadro de mandos localizado en Configuración → Output. Aquí se pueden realizar pruebas sobre los motores.



Figura 4.9 Icono Output de la vista Configuration

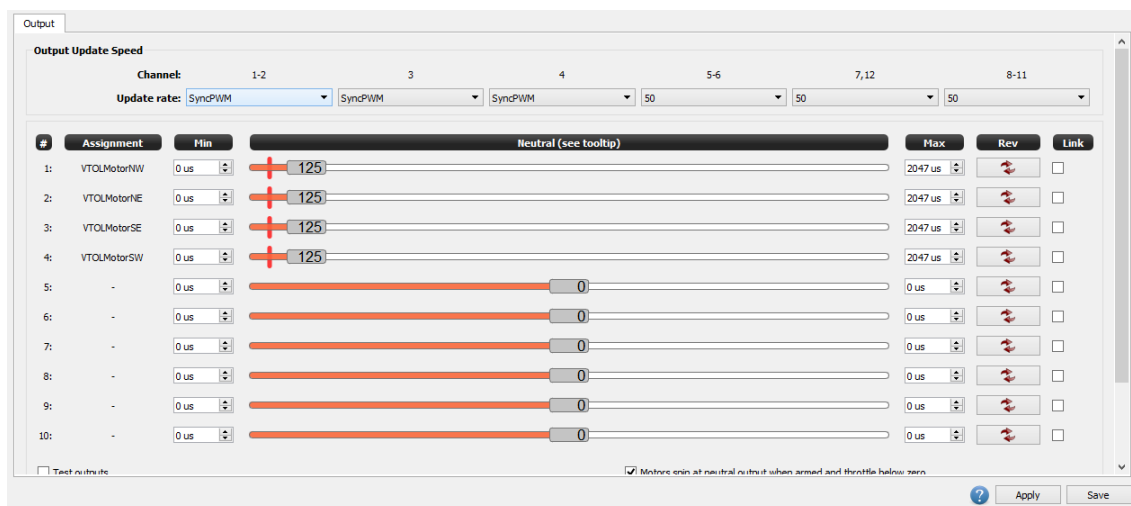


Figura 4.10 Panel Output inicial sin configurar

En primer lugar, aunque la batería no se encuentre aún integrada en el dron, es necesario que esta esté conectada para que puedan girar los motores. Una vez que la batería está conectada, se procede a realizar las pruebas de giro. Las barras horizontales muestran el ciclo de trabajo de la señal que sale del FC y se va a enviar a los motores cuando el dron permanezca en estado neutral. Para hacer girar los motores se puede realizar un test seleccionando la opción *test outputs* y aumentando el ciclo de trabajo en cada motor hasta que comiencen a girar. Cuando el motor gire, hay que observar si lo hace en el sentido correcto o en el opuesto. Si lo hace en el sentido opuesto se deben intercambiar dos cables y el motor girará en el sentido correcto. La operación se realiza con los cuatro motores, uno a uno, hasta obtener el giro deseado en todos ellos.

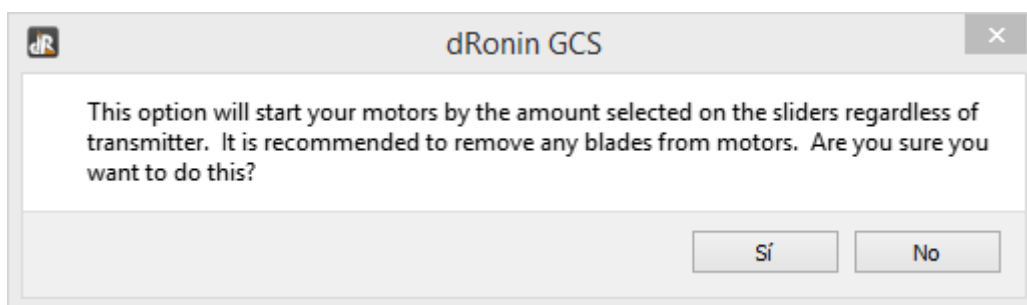


Figura 4.11 Ventana de advertencia. Recomendado motores sin hélices



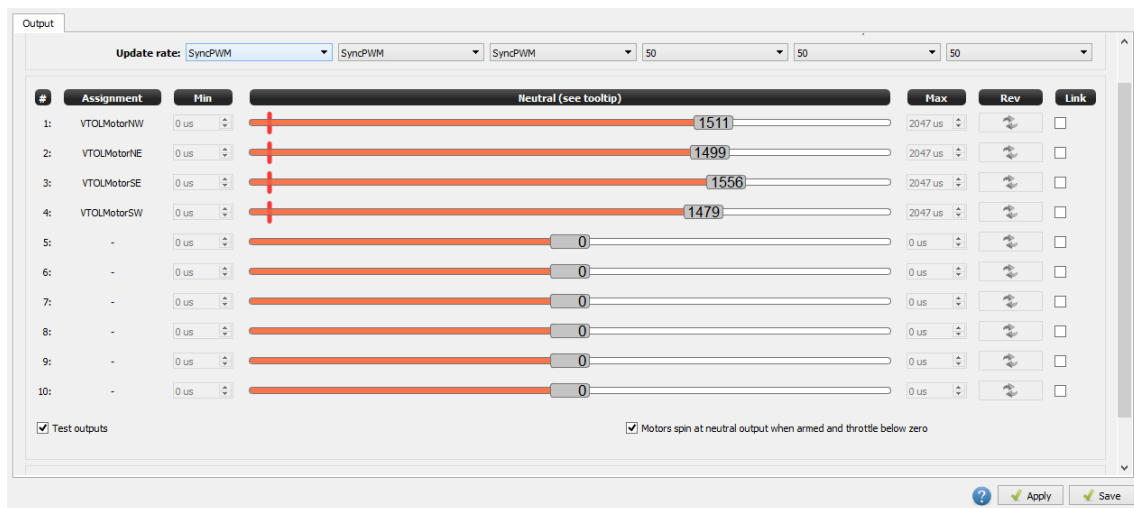


Figura 4.12 Panel Output configurado

Una vez que se realiza esto, se desmarca la opción *test outputs* y se guarda el progreso. Ahora los motores ya están conectados correctamente.

Para que los conectores tipo banana no sean visibles y no haya posibilidad de cortocircuito entre ellos, se recubre cada uno de los tres de cada motor con cinta aislante. Los cables que quedan sueltos del conjunto ESC-motor, así como los propios ESC, se acoplan a los brazos de la estructura del dron por la parte inferior con ayuda de bridas y con cuidado de no dañar ningún componente en su sujeción.



Figura 4.13 Imagen de un brazo del dron en su parte inferior

### 4.5.3. Input

La configuración del input se corresponde básicamente con las opciones de entrada que tiene el dron, es decir, el manejo, los modos de vuelo y el sistema de seguridad del armado. Para empezar, es necesario que el FC reconozca las señales que envía la emisora y por lo tanto es necesario configurarla. Para esta operación también es necesario que la batería del dron esté conectada, pues el receptor necesita estar encendido. Se comienza pulsando *Start Configuration Wizard* y el GCS requiere una serie de acciones sobre la emisora para detectar todos los canales que se van a utilizar. Se configuran los cuatro canales para los movimientos del dron (*Throttle*, *Roll*, *Pitch* y *Yaw*) y dos adicionales para el armado y el modo de vuelo. El canal del armado tendrá dos posiciones y el de modo de vuelo tendrá tres, los máximos que permite esta emisora.



Figura 4.14 Icono Input de la vista Configuration

RC Input | Flight Mode Switch Settings | Arming Settings

Start Configuration Wizard | Manual Calibration (Not Recommended)

| Function   | Type | Number   | Min  | Neutral (see tooltip) | Max  | Current | Reverse |
|------------|------|----------|------|-----------------------|------|---------|---------|
| Throttle   | PWM  | Chan 1   | 1000 | 1040                  | 2000 | 65535   |         |
| Roll       | PWM  | Chan 2   | 1000 | 1500                  | 2000 | 65535   |         |
| Pitch      | PWM  | Chan 4   | 1000 | 1500                  | 2000 | 65535   |         |
| Yaw        | PWM  | Chan 3   | 1000 | 1500                  | 2000 | 65535   |         |
| FlightMode | PWM  | Chan 5   | 1000 | 1500                  | 2000 | 65535   |         |
| Collective | PWM  | Disabled | 1000 | 1500                  | 2000 | 65534   |         |
| Accessory0 | PWM  | Disabled | 1000 | 1500                  | 2000 | 65534   |         |
| Accessory1 | PWM  | Disabled | 1000 | 1500                  | 2000 | 65534   |         |
| Accessory2 | PWM  | Disabled | 1000 | 1500                  | 2000 | 65534   |         |
| Arming     | PWM  | Disabled | 1000 | 1500                  | 2000 | 65534   |         |
| RSSI       | None | Disabled | 1000 |                       | 2000 | 0       |         |

Roll/Pitch/Yaw stick deadband 0.0

Apply Save

Figura 4.15 Panel RCInput inicial sin configurar

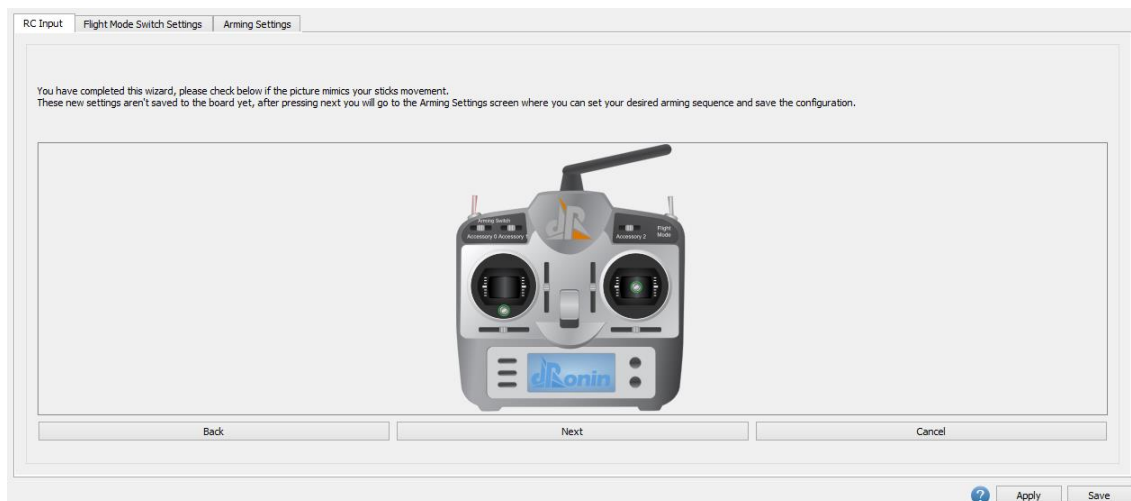


Figura 4.16 Ejemplo de vista de configuración del input

Una vez bien configurados y correctamente detectados los movimientos de la emisora, se procede a configurar el sistema de armado del dron. Este sistema de seguridad deshabilita el despegue del dron cuando éste no se encuentra en condiciones de volar. Se elige un interruptor para armar y desarmar el dron. La palanca *Throttle* debe permanecer en su valor mínimo para que el armado del dron sea efectivo. Además, y como funcionalidades adicionales de seguridad, el dron se desarma cuando la palanca *Throttle* permanece 30 segundos en su valor mínimo o tras 3 segundos sin recibir señal alguna de la emisora.

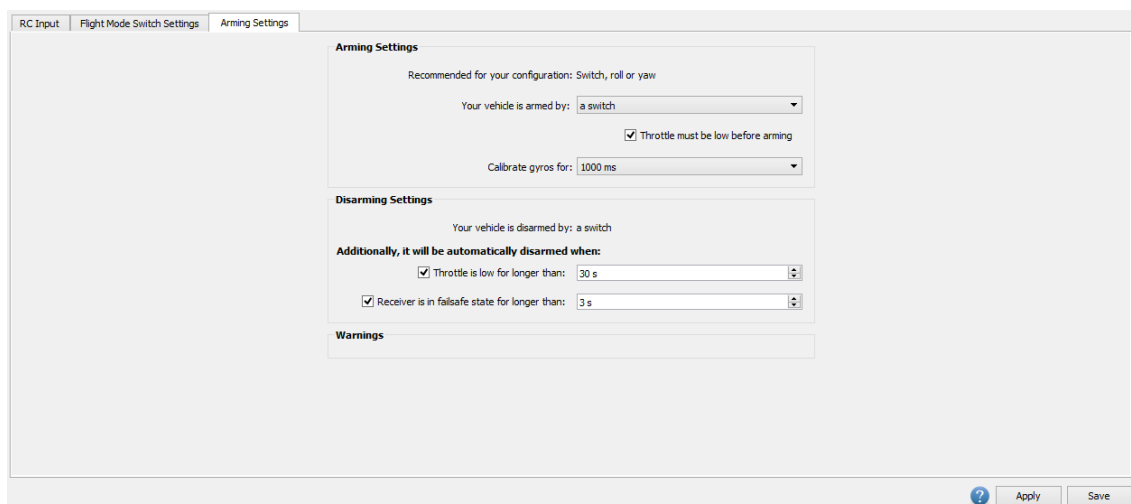


Figura 4.17 Panel Arming Settings configurado

Como primera configuración de los modos de vuelo, en esta pestaña se va a colocar el modo Autotune, que configura los parámetros de estabilización del dron automáticamente después de un vuelo de 1 minuto que se realizará más adelante. Para activar este módulo es necesario, además, dentro de la pestaña de configuración, activar la funcionalidad Autotune mediante un checkbox.

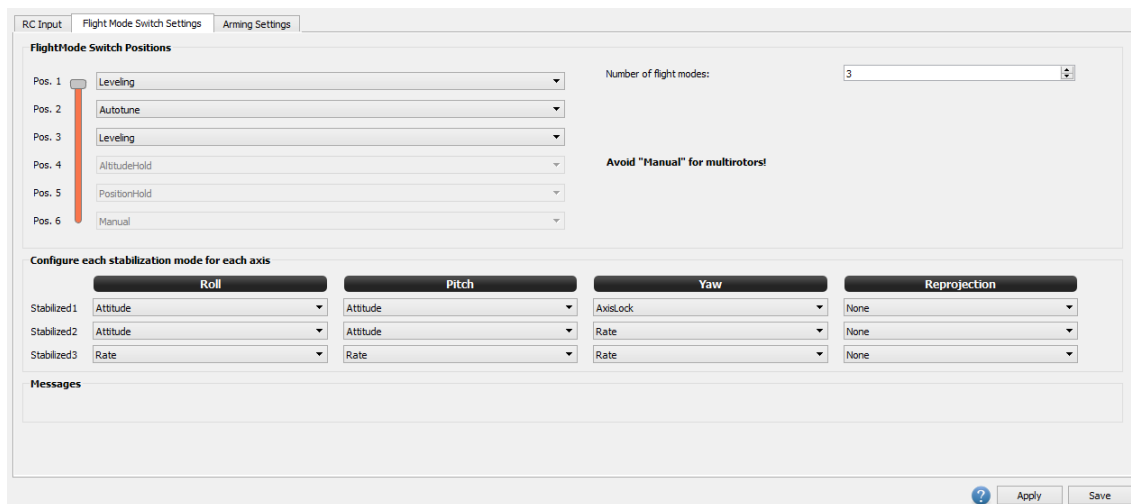


Figura 4.18 Panel Flight Mode Switch Settings con Autotune configurado

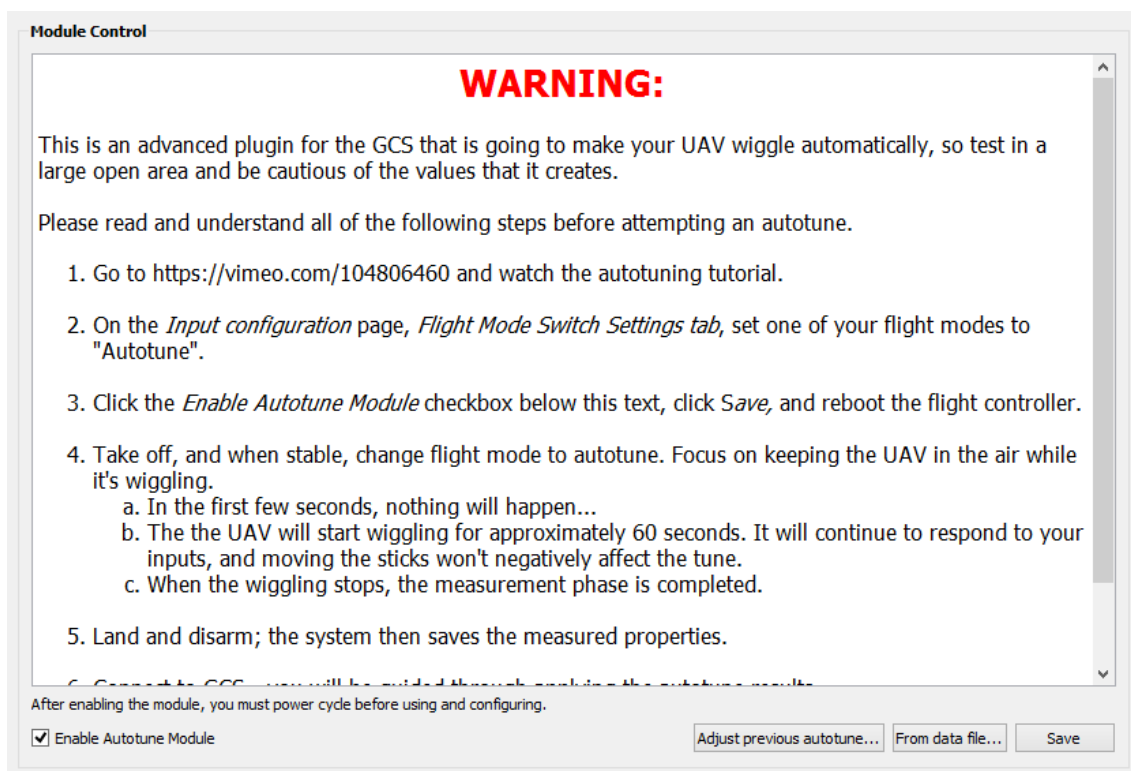


Figura 4.19 Activación del Módulo Autotune


#### 4.6. Montaje del módulo GPS

Para el montaje del módulo GPS, lo primero que se debe tener en cuenta es que los conectores proporcionados por su fabricante no son aptos para el FC de este proyecto. Este módulo viene con un conector apto para la placa Pixhawk. Por lo tanto, los cables deben retirarse de este conector e introducirse en el proporcionado en el kit del FC del

que se dispone. Este conector debe poder introducirse en el Main Port del FC, pues es el que soporta esta función GPS.

Existe otro problema y es que las terminaciones de los cables del módulo tampoco son compatibles con el conector del que se dispone y por tanto es necesario realizar un trabajo de soldadura para incorporar los adecuados y así poder introducirlos en el conector. Para esto se consulta la disposición que deben llevar los cables en el puerto del FC y se procede a colocarlos adecuadamente.

Tabla 4.1 FUNCIÓN DE LOS PINES MAIN PORT (GPS) [26]

| Color  | JST-SH Pin  | Serial Function           |
|--------|---|---------------------------|
|        |  |                           |
| Black  | 1   | GND                       |
| Red    | 2   | PWR Out (VCC Unregulated) |
| Blue   | 3   | TX                        |
| Orange | 4   | RX                        |

El cable negro del GPS es el GND, el rojo es el VCC, el amarillo para recepción, y el verde para transmisión de datos GPS. Cabe resaltar que el cable de transmisión del módulo GPS se coloca en el pin de recepción del Main Port del FC y el de recepción del GPS en el de transmisión del FC.

Una vez conocidas las conexiones a realizar, es necesario que el módulo GPS se encuentre alejado de posibles campos magnéticos que puedan alterar su funcionamiento o disminuir su precisión. Para ello es necesario elevar este módulo respecto al plano horizontal que forman los cuatro motores. Se precisa de una base circular que pueda sujetarse a una altura de aproximadamente 15 cm sobre el nivel superior de la estructura del dron para poder incorporar ahí el módulo GPS. Para realizar este soporte se utiliza una varilla roscada de 5mm, tres tuercas, dos arandelas, un taco de latón y una rueda de plástico de diámetro similar al módulo GPS.

La rueda de plástico se rebaja a la mitad para que sirva de base sólida para el GPS y en el centro se introduce el taco de latón. La varilla roscada se introduce a su vez en el taco de

latón y a medida que va roscando, el taco va expandiéndose, fijándose cada vez más a la rueda de plástico. En la parte de la sujeción, se colocan dos arandelas para no dañar la estructura del dron y se aprietan las tuercas correspondientes. Una vez hecho esto, el módulo GPS se coloca en la parte superior con la pegatina que viene en el kit y queda correctamente sujeto a la estructura.

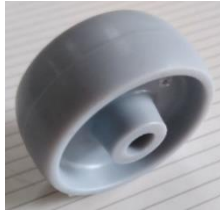


Figura 4.20 Rueda de plástico



Figura 4.21 Rueda rebajada, varilla roscada y taco de latón

Se aplica una mano de pintura negra a lo largo de la varilla y posteriormente el cable que debe conectarse al FC se baja por esta hasta introducirse en el *MainPort* del FC.



Figura 4.22 Sujeción del módulo GPS a la estructura del dron



Figura 4.23 Sujeción del módulo GPS a su soporte circular

Una vez que el módulo se encuentra correctamente instalado y conectado, es hora de configurar la comunicación entre el FC y el GPS. Para ello se conecta el FC mediante USB al ordenador y se abre el GCS para su configuración. En el apartado de Hardware, es necesario señalar que el GPS se encuentra instalado en el *MainPort*.

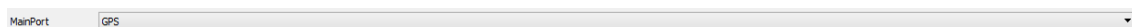


Figura 4.24 GPS asignado al MainPort

Una vez guardados los cambios, se configura su funcionamiento en el apartado de módulos. En primer lugar, es necesario activar el propio módulo GPS. Una vez activado, en la pestaña dedicada a su configuración, es necesario seleccionar el protocolo de

comunicación entre el FC y el módulo GPS. El protocolo utilizado es UBX, propiedad de la empresa u-blox, encargada de realizar receptores GPS, entre ellos el utilizado en este proyecto. La velocidad de transmisión se establece en el valor por defecto para estas comunicaciones, 57600, y se marca la opción de autoconfiguración del GPS.



Figura 4.25 Icono Modules de la vista Configuration

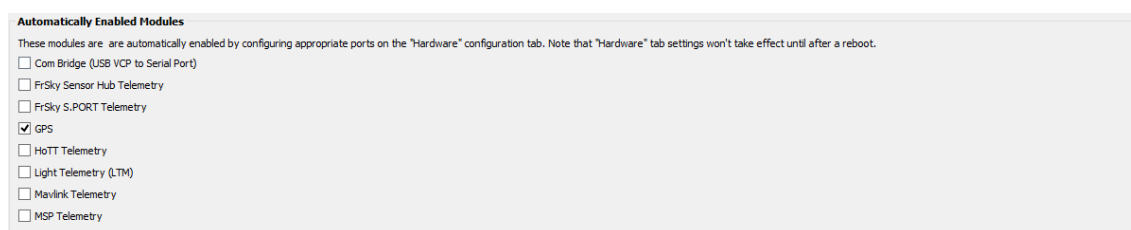


Figura 4.26 Relación de módulos



Figura 4.27 Pestaña GPS y configuración disponible

Si el propio FC no fuese capaz de configurar el módulo GPS, sería necesaria la adquisición de un adaptador FTDI para hacer posible la conexión del GPS directamente al ordenador mediante USB. También sería necesario el uso del software u-center, de u-blox para realizar la configuración completa del GPS. En este caso, la placa FC es capaz de configurar automáticamente el GPS y por lo tanto no se encuentra ningún problema relacionado con su correcto funcionamiento.

#### 4.7. Integración de la batería


La batería es el elemento más pesado de todos y por lo tanto debe estar situado lo más bajo posible con el objetivo de que el centro de gravedad del dron se sitúe en un punto bajo y sea más sencillo su control de estabilidad. Se sitúa por tanto en la parte inferior de la estructura del dron. Para ello se corta una plancha de fibra de carbono de las medidas de la batería y se adhieren unas protecciones ante cualquier golpe que pueda producirse. Se perfora también la placa de fibra de carbono y se realizan dos aberturas en sus laterales para colocar una cinta de velcro que sujetará la batería. Una vez fabricada esta pieza adicional, se coloca velcro adhesivo en la placa de fibra de carbono y en las partes de la

estructura que contactan con la batería. Como es lógico, también se coloca el velcro correspondiente en la batería para que ésta no se desplace en el vuelo.

Una vez todo preparado, se atraviesa una cinta de velcro por la estructura inferior del dron y por la placa de fibra de carbono, situando la batería entre ellas. Así queda colocada la batería de forma segura con las protecciones colocadas en la placa de fibra de carbono como primer elemento que contactaría con el suelo.

Además de la colocación de la batería, es necesario fabricar un sistema que mida su carga en pleno vuelo y que sea capaz de detectar posibles fallos en ella. Para esto se cuenta con el puerto *Power Sensor/Sonar* capaz de medir el voltaje aplicado entre dos puntos.

Tabla 4.2 FUNCIÓN DE LOS PINES POWER SENSOR [26]

| Color  | JST-SH Pin  |                           |
|--------|---|---------------------------|
|        |  | Power Sensor              |
| Black  | 1   | GND                       |
| Red    | 2   | PWR Out (VCC Unregulated) |
| Blue   | 3   | Current Input             |
| Orange | 4   | Voltage Input             |

Para ello se consultan de nuevo las propiedades de la placa y se observa que es capaz de medir una tensión máxima de 3.3V. La batería utilizada tiene unos 12V y por tanto es necesario fabricar un divisor de tensión. Para realizar el divisor de tensión, primero hay que determinar de dónde se obtienen los 12V de la batería. Se decide que el voltaje de la batería se va a obtener a través del conector libre que queda en la propia batería, a través del cual se realizan las cargas balanceadas, ya que se pueden obtener las tensiones de cada celda por separado. Se precisa por tanto un conector JST-XH 3S macho para poder conectarlo a la batería. De los cuatro pines que posee el conector, son necesarios los dos exteriores, que proporcionan la tensión total de la batería. El divisor de tensión se realiza con resistencias de un valor muy alto para que la descarga de la batería mientras se encuentra conectada sea mínima. Se instalan por lo tanto cuatro resistencias de 1MOhmio soldadas en serie y se toma la tensión de una de ellas, siendo el valor máximo de 3.15V, que se obtiene de dividir entre cuatro la tensión máxima de la batería si sus tres celdas se



encuentran a 4.2V. Esta tensión de 3.15V es soportada por el FC, que puede medir hasta 3.3V como se ha apuntado anteriormente.

Para obtener el valor de una resistencia, es necesario soldar a los bornes del componente dos cables, que serán los encargados de tomar un cuarto de la tensión total en la batería ( $V_{medida}$ ). Estos dos cables deben ser a su vez introducidos en el conector válido del puerto correspondiente según indican las características de este puerto. Una vez realizadas las conexiones oportunas, el divisor de tensión ya está operativo.

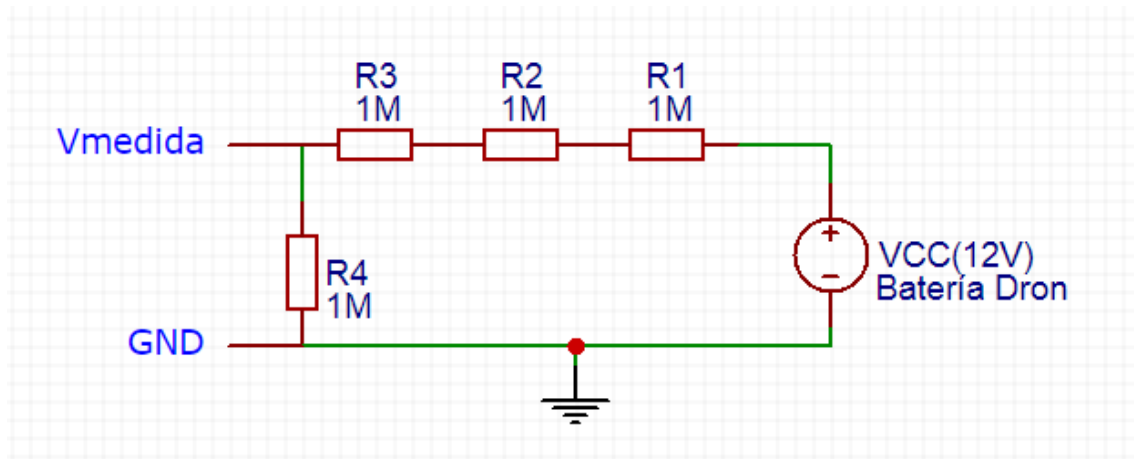


Figura 4.28 Configuración del divisor de tensión

El siguiente paso es configurar en el GCS el módulo de la batería. Para ello, en la sección de módulos, se activa el *Battery Monitoring* y se realizan algunos ajustes en la pestaña correspondiente. Para empezar, se seleccionan el número de celdas de la batería y su capacidad. El cable de tensión se encuentra en el pin 4 del puerto, por lo tanto, se selecciona también en las opciones disponibles. Sería deseable que el valor de tensión mostrado fuese el de una de las tres celdas de la batería y no el que se está obteniendo en la resistencia. Como la batería está dividida en tres celdas iguales y la tensión de la resistencia es un cuarto del total, la proporción debe ser de 1 a 1,33 para así obtener el valor real de la celda. Con este ajuste ya se puede controlar la carga de la batería, pues el valor de cada celda completamente cargada debe ser de aproximadamente 4.2V, valor que no debe bajar de 3.6V o 3.5V en su descarga. Se ajusta también el offset de la medida en 0.1V ya que el polímetro del que se dispone indica un voltaje un poco diferente al inicialmente detectado por el FC. Para evitar que el dron se arme con valores inferiores a éstos, se coloca en las alertas el valor de 3.5V para hacer imposible su despegue con valores críticos de batería.

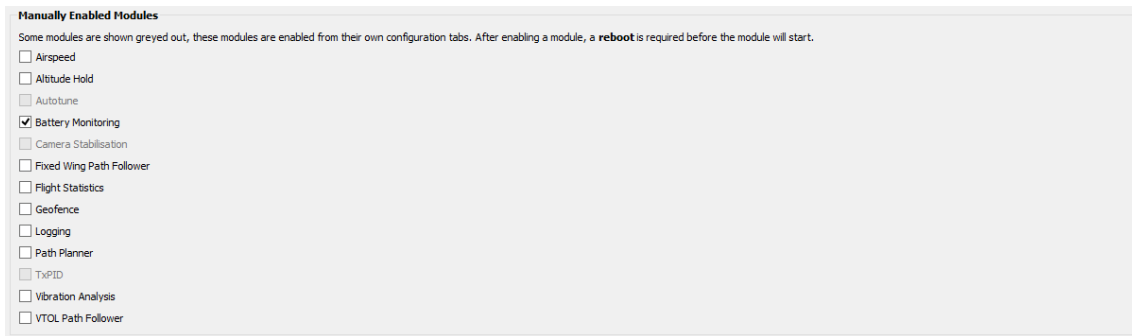


Figura 4.29 Lista de módulos

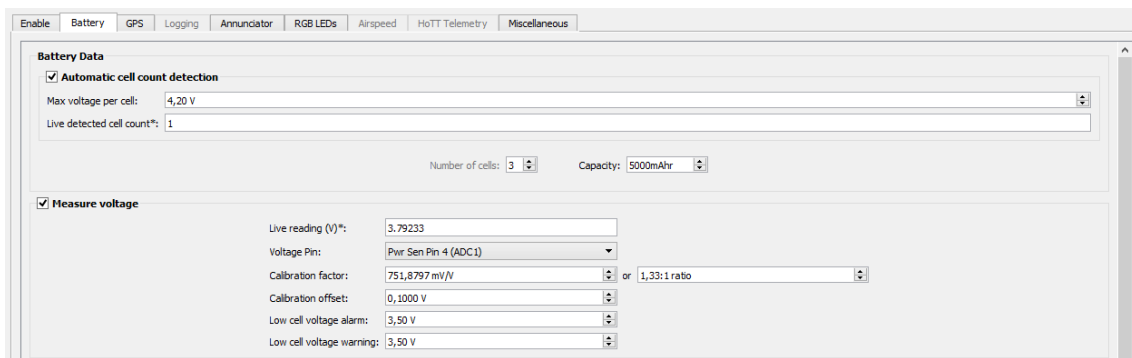


Figura 4.30 Pestaña de configuración del módulo de la batería

## 4.8. Integración de la Raspberry PI

La Raspberry PI debe integrarse en el dron junto con su batería. Se va a utilizar la estructura propia de la marca Raspberry destinada a la construcción de cluster, es decir, una estructura normalmente habilitada para apilar Raspberrys. Se coloca por tanto en un primer nivel la propia Raspberry PI y en un segundo nivel su batería.

La batería se acopla fácilmente en la parte superior y se añaden cintas de velcro para mejor sujeción. En la parte inferior se acopla debidamente la Raspberry. Una vez construida la estructura, ésta debe situarse en la parte superior del dron. Para ello se coloca velcro adhesivo en las partes en contacto para asegurar mejor la sujeción y cuatro bridas en los extremos para presionar contra la estructura del dron. Una vez colocado el módulo, se realiza la conexión correspondiente entre el FC y el puerto USB de la Raspberry.

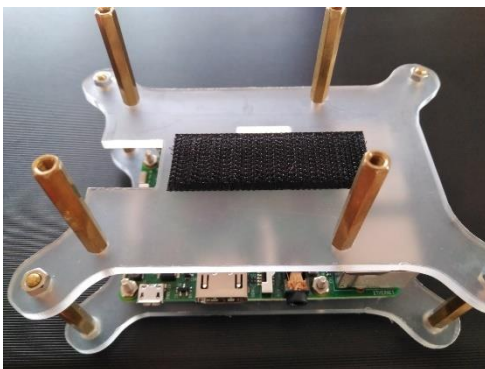


Figura 4.31 Estructura Raspberry sin batería

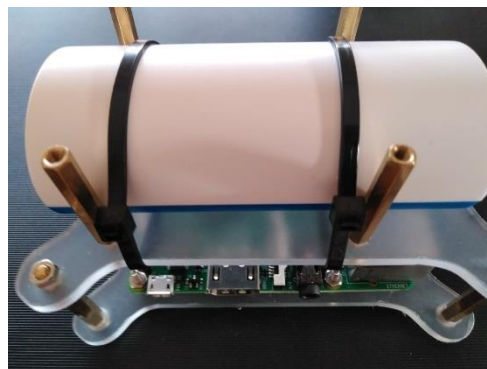


Figura 4.32 Estructura Raspberry con batería



Figura 4.34 Frontal de la estructura Raspberry

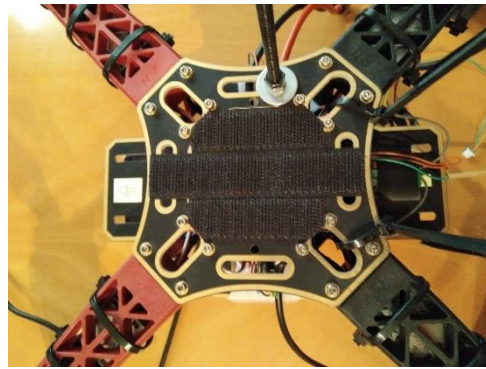


Figura 4.33 Parte superior en contacto con la estructura Raspberry

## 5. INTEGRACIÓN DE TODOS LOS SISTEMAS

### 5.1. Preparación Raspberry PI

La Raspberry PI 3 Model B ejecuta o inicializa el sistema operativo que encuentre en la tarjeta microSD introducida en su interior. Los fabricantes de esta placa han desarrollado una distribución Linux llamada Raspbian que está diseñada para ejecutarse en la Raspberry. Para esto es necesario en primer lugar realizar la descarga de la imagen del sistema operativo desde la propia página web de Raspberry. En este proyecto se utiliza la versión correspondiente a la fecha 18-04-2018. Una vez descargada, se instala una imagen del sistema operativo en la tarjeta microSD. Se utiliza para ello el software Etcher.

La siguiente imagen del software Etcher muestra el proceso de escritura de la imagen en la tarjeta microSD.

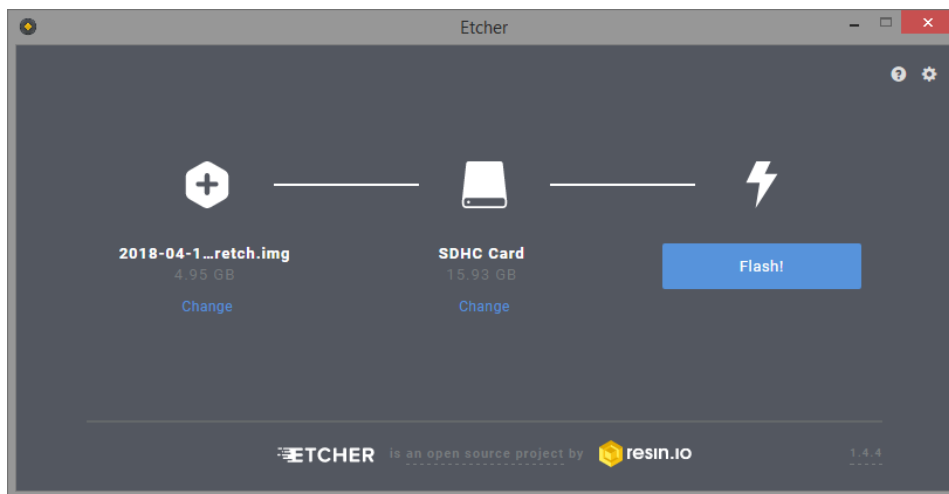


Figura 5.1 Escritura microSD (1)

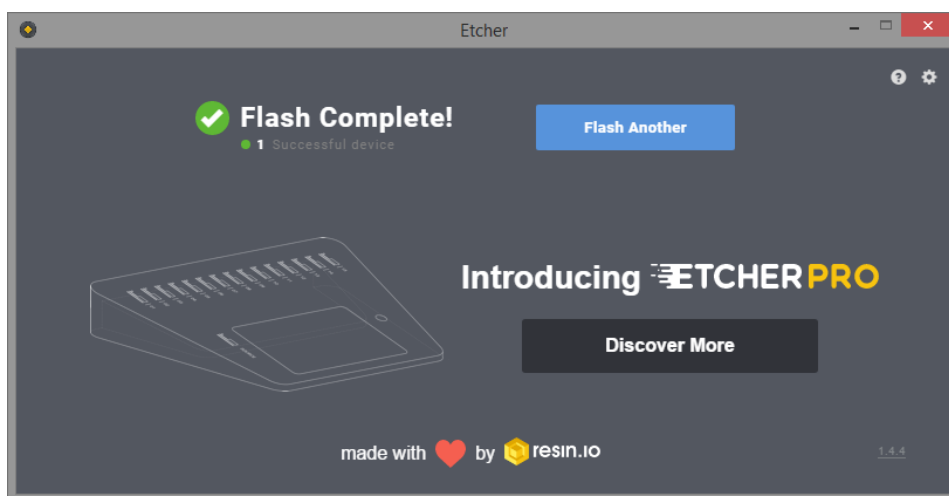


Figura 5.2 Escritura microSD (2)

Una vez que la imagen se encuentra correctamente grabada en la microSD es momento de introducirla en la ranura adecuada de la Raspberry. A partir de este momento, es necesario contar con un ratón y teclado USB conectados a la Raspberry para poder controlarla, así como un monitor con conexión HDMI para poder ver las acciones que se realizan en la Raspberry. Una vez que se cuenta con todo lo anterior, se alimenta la Raspberry mediante un conector microUSB y ésta se enciende automáticamente. Al inicio conviene configurar la zona horaria en la que se encuentra y el idioma del teclado. El primer paso es conectarse a una red para poder actualizar el software si es que existiesen nuevos paquetes a actualizar. Una vez conectados, en este caso a una red Wi-Fi, se ejecutan los siguientes comandos para hacer efectiva la actualización.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get update
```

Figura 5.3 Comando update

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get upgrade
```

Figura 5.4 Comando upgrade

Una vez actualizado el sistema, es necesaria otra herramienta más de software llamada socat. Se explica más adelante por qué se ha elegido este software y cuál es la función que desempeña. Para descargarlo e instalarlo se ejecuta el siguiente comando:

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install socat
```

Figura 5.5 Instalación software socat

En este momento ya se tienen las herramientas necesarias para comenzar a trabajar con la Raspberry y, por lo tanto, se ejecuta el comando reboot para que se reinicie.

```
pi@raspberrypi:~ $ reboot
```

Figura 5.6 Reinicio de la Raspberry

## 5.2. Comunicación GCS-Dron

Hasta el momento, la comunicación que se ha establecido entre el GCS y la placa FC del dron ha sido mediante un cable USB-microUSB. Gracias a esto se ha podido configurar el funcionamiento general del sistema de vuelo. El siguiente paso hacia los objetivos marcados es eliminar este cable y conseguir que la comunicación sea inalámbrica. Para conseguir esto debe entrar en el escenario de configuración la Raspberry, que es el elemento capaz de establecer comunicaciones inalámbricas, ya que el FC no puede. La Raspberry y el FC deben estar conectados mediante un cable USB-microUSB igual que el empleado anteriormente en la conexión FC-Ordenador.

Una vez bien definida la configuración física del escenario, es necesario establecer el protocolo mediante el cual el ordenador, a través de la Raspberry, obtendrá los datos del FC. Se considera la posibilidad de instalar el software GCS en la Raspberry y acceder a él desde el ordenador en tierra. Esta opción establecería una conexión directa FC-

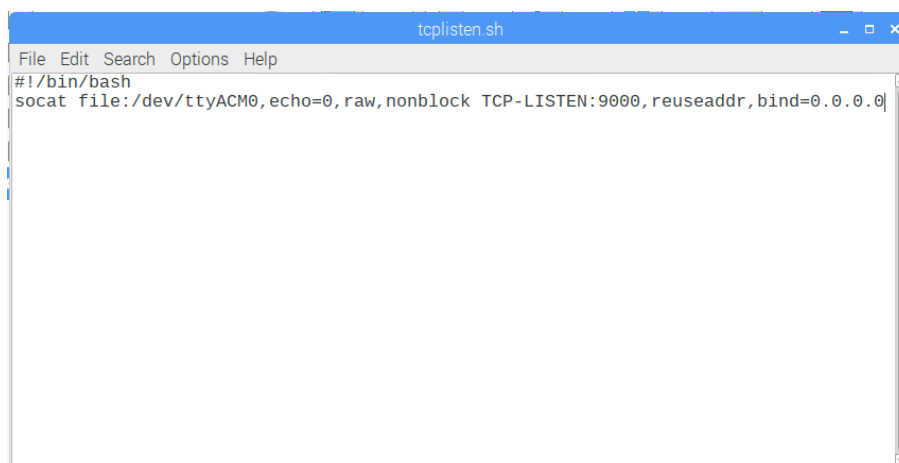
Raspberry que intercambiaría datos de telemetría. Al permanecer la GCS en la Raspberry y por lo tanto en el aire durante un vuelo, se deshecha esta opción por perder la propia esencia de la GCS, que como sus propias siglas indican significa Estación de Control en Tierra.

Es necesario por tanto buscar una alternativa con el requisito de que el software GCS esté instalado en tierra, en un ordenador. La Raspberry en este caso debe hacer el papel de un puente que conecta el software GCS con la placa FC, sin intervenir en ningún caso en la lectura o escritura de los datos que entre ellos se envíen, desconociendo por tanto la telemetría del dron.

El software GCS tiene dos opciones de establecer comunicaciones para obtener telemetría. Una es la que se ha utilizado hasta ahora, la comunicación mediante USB, y la otra es mediante el establecimiento de una conexión TCP. Es evidente por tanto que la opción utilizada debe ser la segunda, el establecimiento de una conexión TCP entre el ordenador del GCS y la Raspberry.

El objetivo es establecer una comunicación desde la GCS en la cual los datos enviados a la Raspberry salgan del puerto USB de esta hacia el FC, y viceversa, sin que la Raspberry interactúe con ellos en ninguno de los dos sentidos. Puesto que no se pueden establecer conexiones TCP con un puerto USB de una máquina, se necesita relacionar un puerto IP con un puerto USB. La idea es que los datos que entren a ese puerto IP salgan por el puerto USB y viceversa. Para ello se ha realizado un estudio sobre diferentes herramientas de software y se ha decidido utilizar el programa llamado socat. Este permite establecer una vía de comunicación bidireccional entre dos fuentes y con unas características personalizadas a través de la línea de comandos.

El establecimiento de la conexión bidireccional en la Raspberry se realiza entre el puerto 9000 de la máquina (0.0.0.0) y el puerto USB denominado por `/dev/ttyACM0`. Para realizar la operación más rápida y sencilla se crea un script llamado *tcplisten.sh* para que se ejecute el comando cada vez que se invoque y se le proporcionan permisos de ejecución.



```
tcplisten.sh
File Edit Search Options Help
#!/bin/bash
socat file:/dev/ttyACM0,echo=0,raw,nonblock TCP-LISTEN:9000,reuseaddr,bind=0.0.0.0
```

Figura 5.7 Script *tcplisten.sh*

```
pi@raspberrypi:~ $ chmod u+x tcplisten.sh
```

Figura 5.8 Comando que otorga permisos de ejecución

Para el futuro acceso remoto a la Raspberry, es necesario habilitar las conexiones SSH en el puerto 22, ya que por defecto están desactivadas. Para ello se accede al menú de configuración mediante el comando `sudo raspi-config` y se habilita dicha opción.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo raspi-config
```

Figura 5.9 Configuración SSH Raspberry (1)

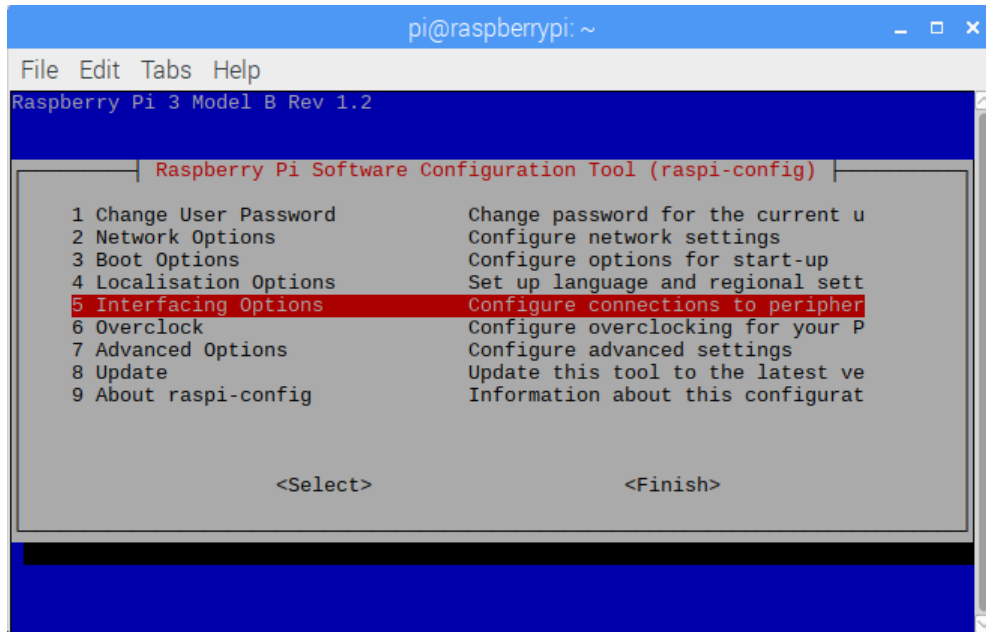


Figura 5.10 Configuración SSH Raspberry (2)

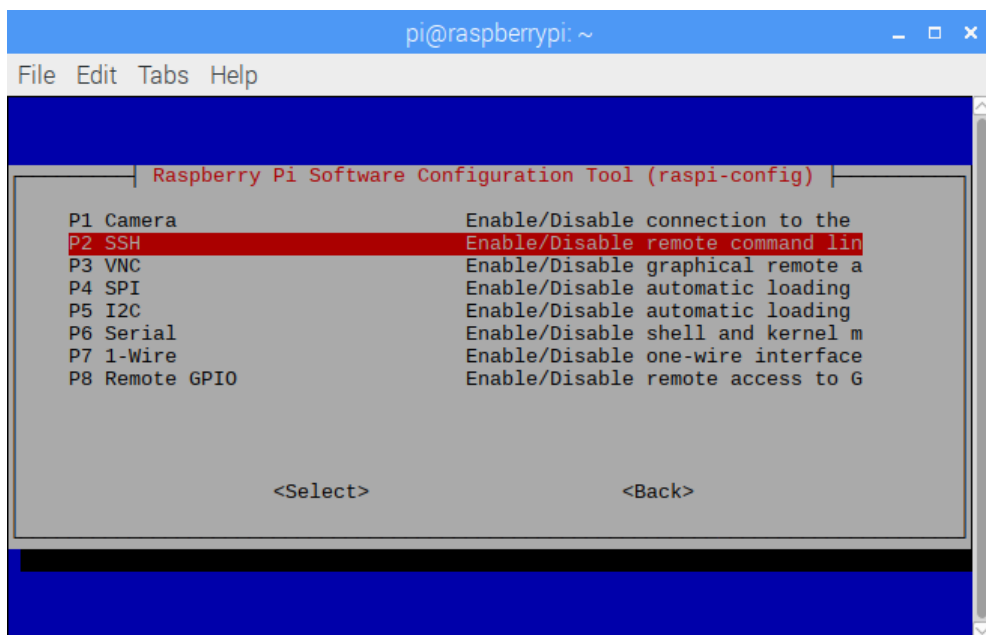


Figura 5.11 Configuración SSH Raspberry (3)

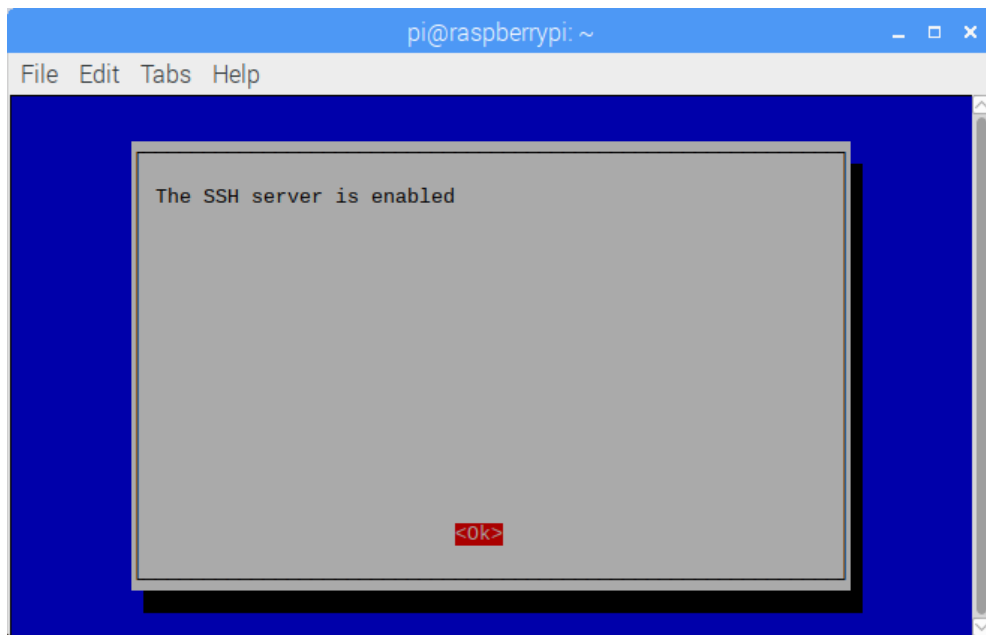


Figura 5.12 Configuración SSH Raspberry (4)

Una vez realizados los pasos anteriores, es necesario cambiar la configuración del puerto USB del FC para que sea capaz de comunicarse con el nuevo escenario planteado. Para ello se accede de nuevo directamente por USB al GCS y se procede a cambiar la configuración. En el apartado hardware se muestran dos opciones USB\_HIDPort y USB\_VCPPort. Hasta este momento la telemetría ha sido enviada a través del puerto HID (*Human Interface Device*). Para la configuración que se desea realizar, es necesario habilitar el puerto VCP (*Virtual Com Port*) como el responsable de la telemetría y deshabilitar el HID. Es importante que uno esté habilitado y otro deshabilitado, pues el software no soporta tener ambos activados. Una vez que el puerto VCP haya sido marcado como USBTelemetry y se guarden los cambios, al reiniciar el FC éste ya no será reconocido si es conectado directamente por cable USB al GCS. Para deshacer esta configuración deberá accederse al FC ya a través de la conexión inalámbrica que se pretende realizar.

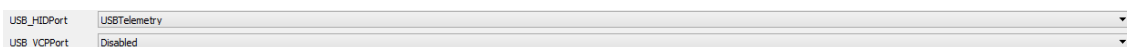


Figura 5.13 Puerto HID habilitado

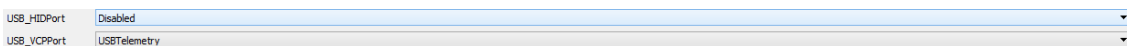


Figura 5.14 Puerto VCP habilitado

El siguiente paso es configurar en el software GCS la dirección IP y el puerto al que se va a realizar la petición de establecimiento de la conexión TCP, en principio, la IP de la Raspberry y su puerto 9000 designado ya anteriormente. Esta configuración es accesible a través de Herramientas → Opciones... → IP Network Telemetry. Esto dependerá de la situación en la que se encuentre conectada la Raspberry a una red y por tanto se explica en los siguientes apartados.



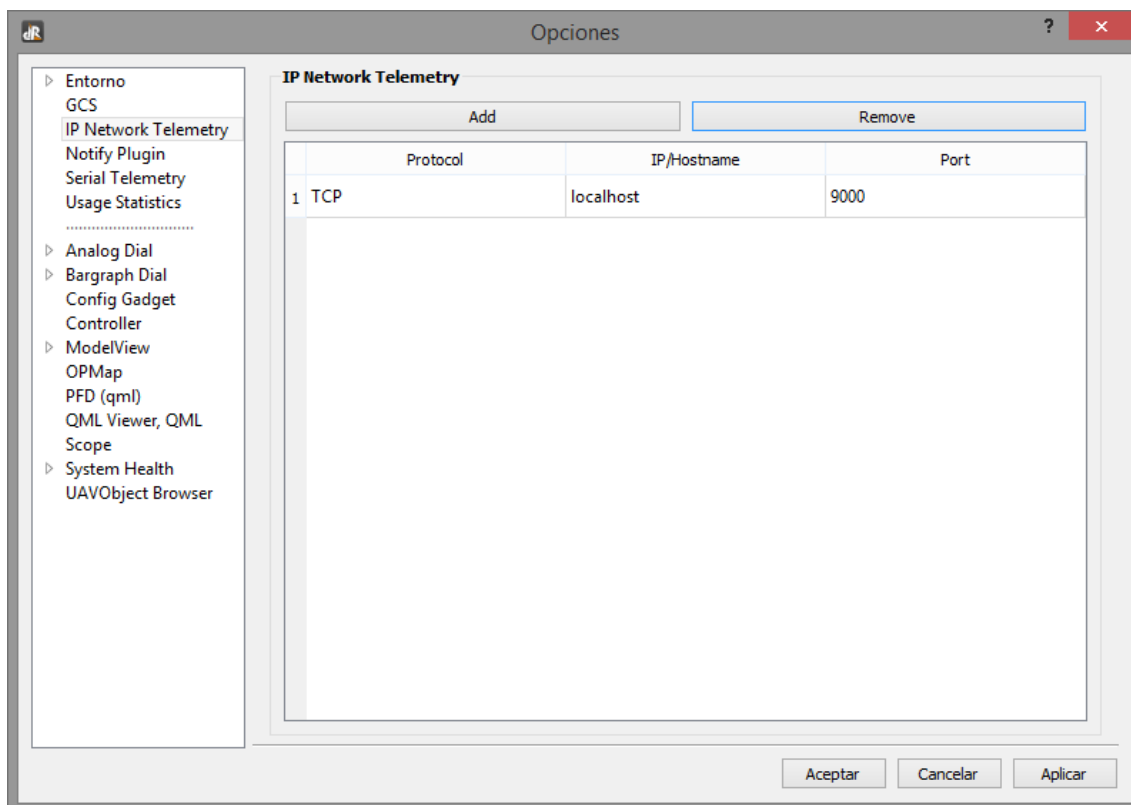


Figura 5.15 Ventana del GCS de configuración

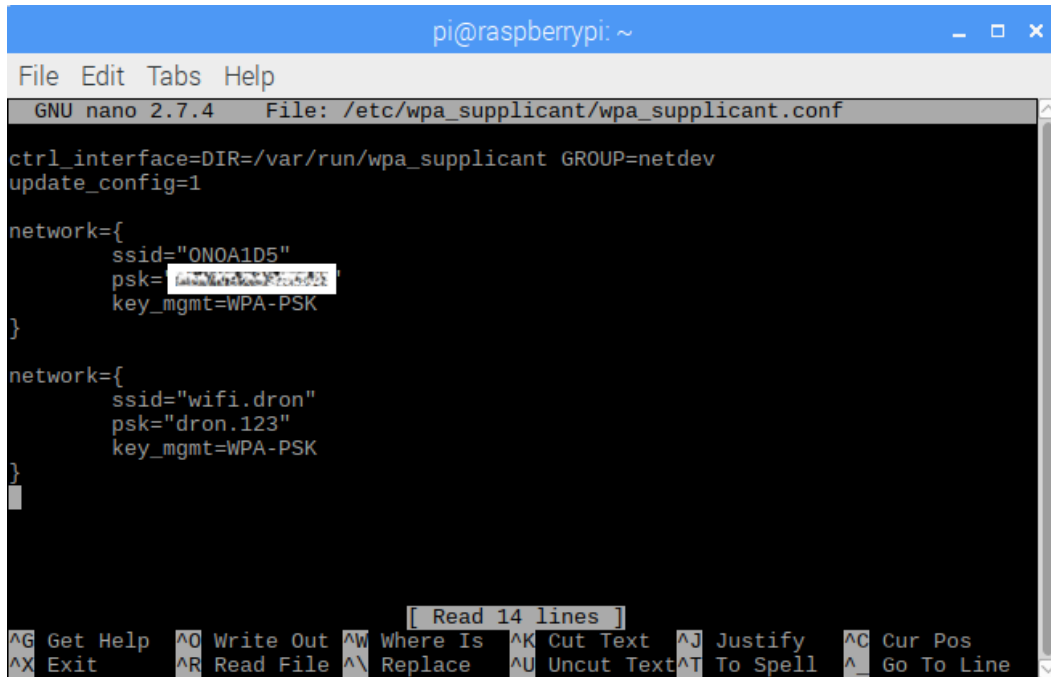
### 5.3. Comunicación a través de la Raspberry PI (Wi-Fi).

Para conseguir una comunicación a través de una red Wi-Fi entre la estación en tierra GCS y el dron, se conectan ambos a la misma subred. En este escenario de pruebas el radio de funcionamiento del sistema será limitado, puesto que los lugares donde no llegue señal Wi-Fi no podrá desarrollarse la actividad. Tanto el ordenador como el dron deben permanecer con cobertura Wi-Fi.

Una vez explicado el escenario, es necesario conocer las características de la red para poder configurar la Raspberry y que ésta se conecte automáticamente, utilizando una IP estática para poder acceder a ella desde el ordenador en tierra. Para realizar las configuraciones necesarias en la Raspberry es necesario modificar dos archivos: `/etc/dhpcd.conf` y `/etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf`. El primero es el encargado de que, al conectarse a una red por una interfaz determinada, se use la IP estática y poder acceder así a las configuraciones de la Raspberry a través de esta IP. El segundo recoge los datos necesarios para poder conectarse a una red Wi-Fi, como pueden ser el nombre o la contraseña. Una vez realizados estos ajustes, se tiene seguridad sobre qué IP tiene la Raspberry cuando se conecta a la red Wi-Fi conocida y por tanto se puede acceder a ella mediante SSH. Esta configuración Wi-Fi se desarrolla en modo infraestructura, siendo el punto de acceso un router con acceso a Internet.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo nano /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf
```

Figura 5.16 Acceso al archivo /etc/wpa\_supplicant/wpa\_supplicant.conf



```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.7.4 File: /etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf

ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1

network={
    ssid="ON0A1D5"
    psk=[REDACTED]
    key_mgmt=WPA-PSK
}

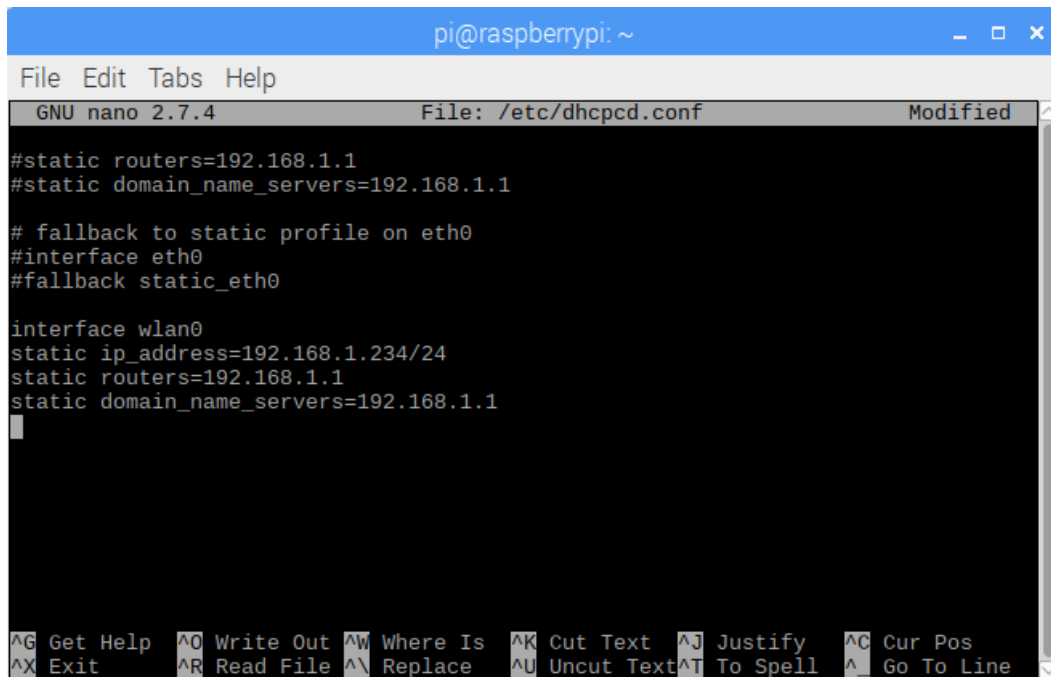
network={
    ssid="wifi.dron"
    psk="dron.123"
    key_mgmt=WPA-PSK
}

[ Read 14 lines ]
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Spell ^_ Go To Line
```

Figura 5.17 Archivo /etc/wpa\_supplicant/wpa\_supplicant.conf

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo nano /etc/dhcpd.conf
```

Figura 5.18 Acceso al archivo /etc/dhcpd.conf



```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.7.4 File: /etc/dhcpd.conf Modified

#static routers=192.168.1.1
#static domain_name_servers=192.168.1.1

# fallback to static profile on eth0
#interface eth0
#fallback static_eth0

interface wlan0
static ip_address=192.168.1.234/24
static routers=192.168.1.1
static domain_name_servers=192.168.1.1

^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Spell ^_ Go To Line
```

Figura 5.19 Archivo /etc/dhcpd.conf

```
pi@raspberrypi:~ $ reboot
```

Figura 5.20 Reinicio de Raspberry

Una vez configurados ambos ficheros, se comprueba mediante el siguiente comando que la IP estática de la Raspberry es la correcta.

```
pi@raspberrypi:~ $ ifconfig
```

Figura 5.21 Comando de configuración de interfaces de red

```
wlan0: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
    inet 192.168.1.234 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.1.255
    inet6 fe80::b449:294b:b2fb:20a8 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
    ether b8:27:eb:29:8c:4b txqueuelen 1000 (Ethernet)
    RX packets 6 bytes 716 (716.0 B)
    RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
    TX packets 36 bytes 5412 (5.2 KiB)
    TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
```

Figura 5.22 Configuración de la interfaz wlan0 (Interfaz Wi-Fi)

Es buena práctica cambiar la contraseña por defecto para acceder por SSH a la Raspberry. Por lo tanto, se procede a ello.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo raspi-config
```

Figura 5.23 Configuración contraseña Raspberry (1)

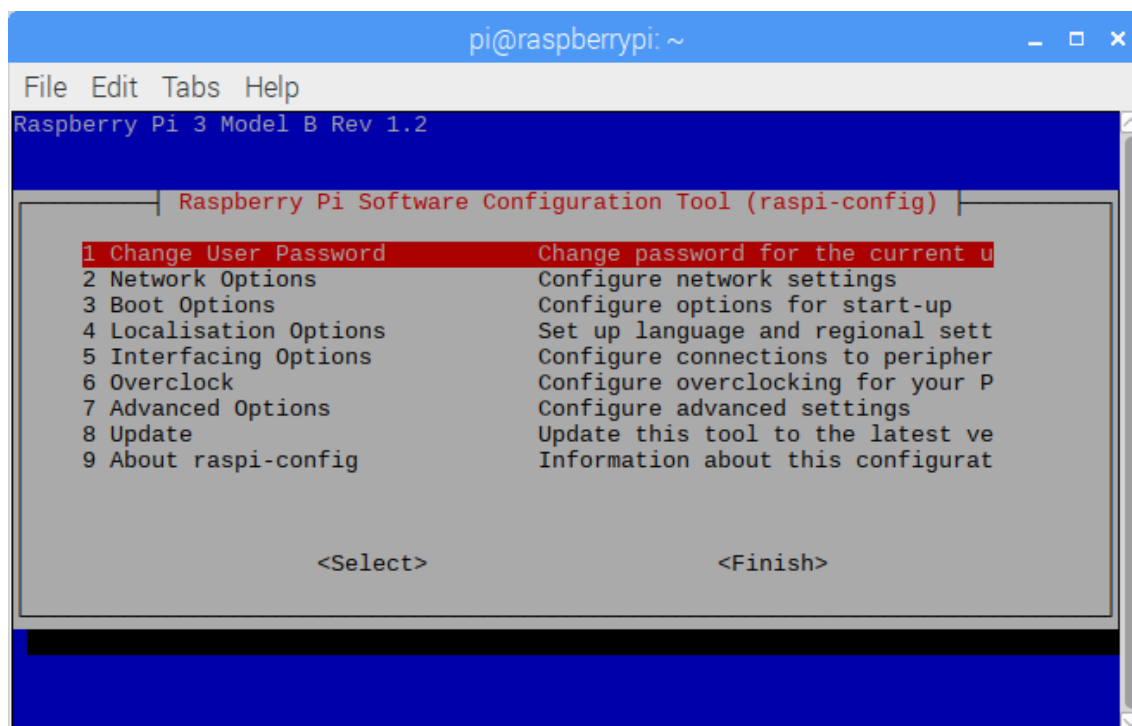


Figura 5.24 Configuración contraseña Raspberry (2)

```
Enter new UNIX password:  
Retype new UNIX password: █
```

Figura 5.25 Configuración contraseña Raspberry (3)

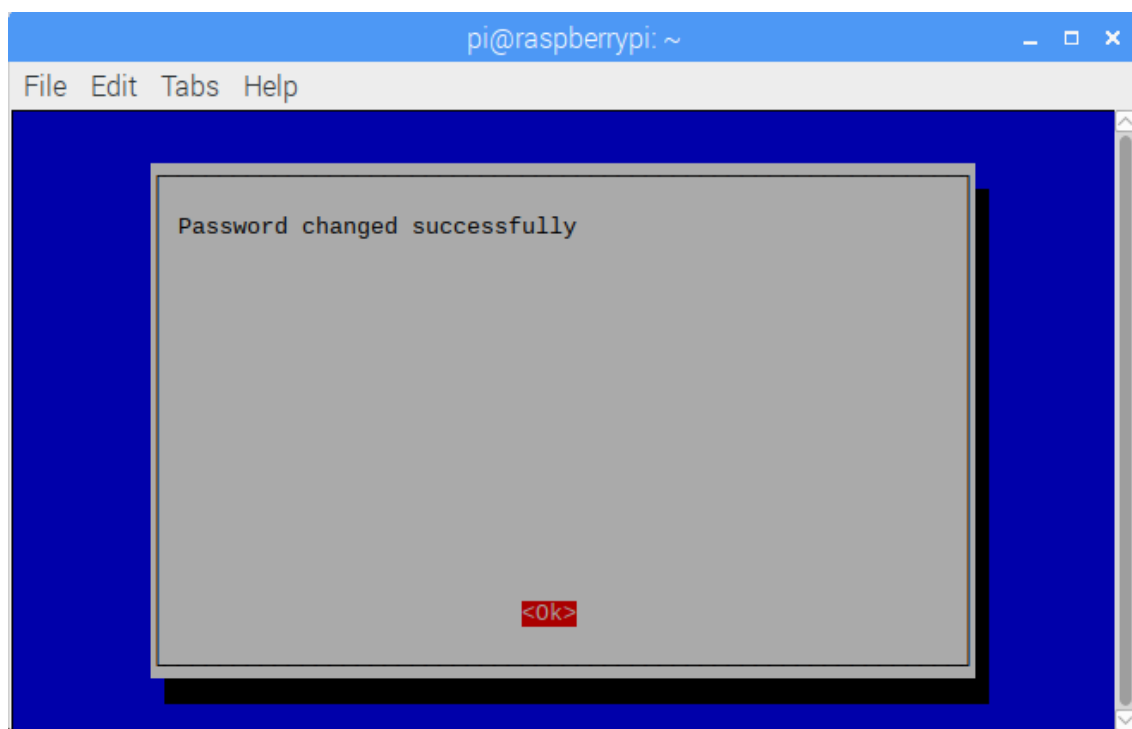


Figura 5.26 Configuración contraseña Raspberry (4)

```
pi@raspberrypi:~ $ reboot
```

Figura 5.27 Configuración contraseña Raspberry (5)

Para el acceso mediante SSH a la Raspberry es necesario utilizar el software Putty. Una vez iniciado en el ordenador, se introduce en él la IP de la Raspberry y se deja el puerto por defecto de SSH, el 22. Ejecutando esto se solicita el nombre de usuario y la contraseña en la Raspberry. Si todo es introducido correctamente, ya es posible ejecutar comandos remotamente.

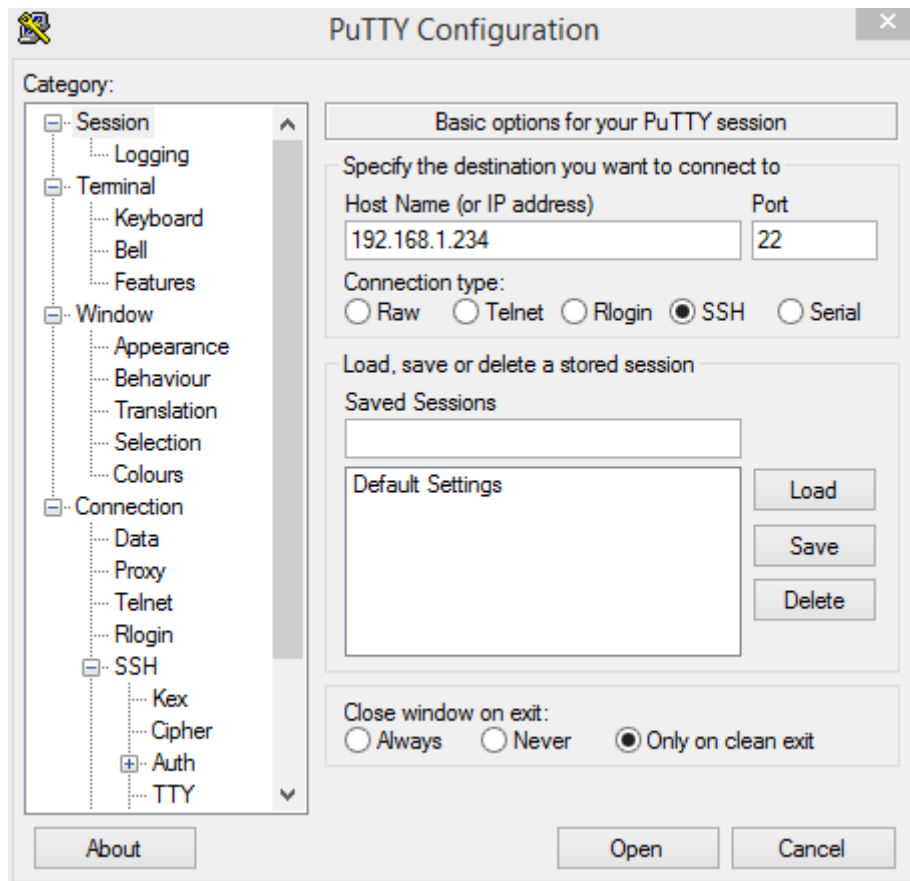


Figura 5.28 Ventana de Putty para establecer conexión SSH con la IP192.168.1.234

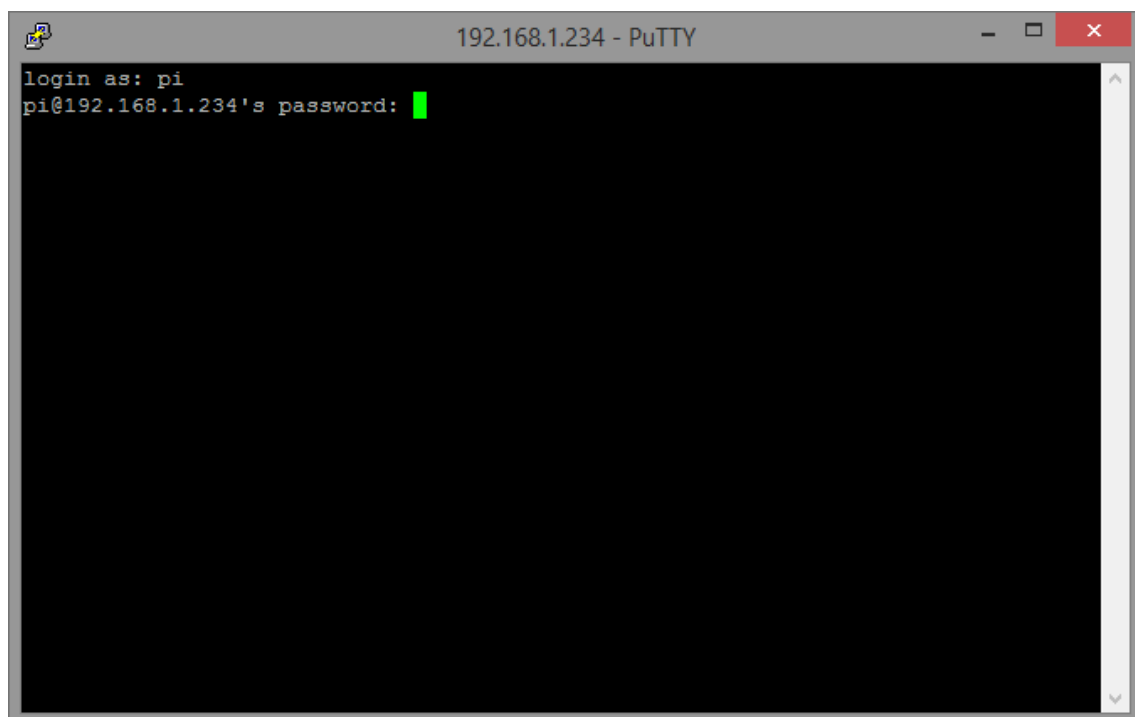
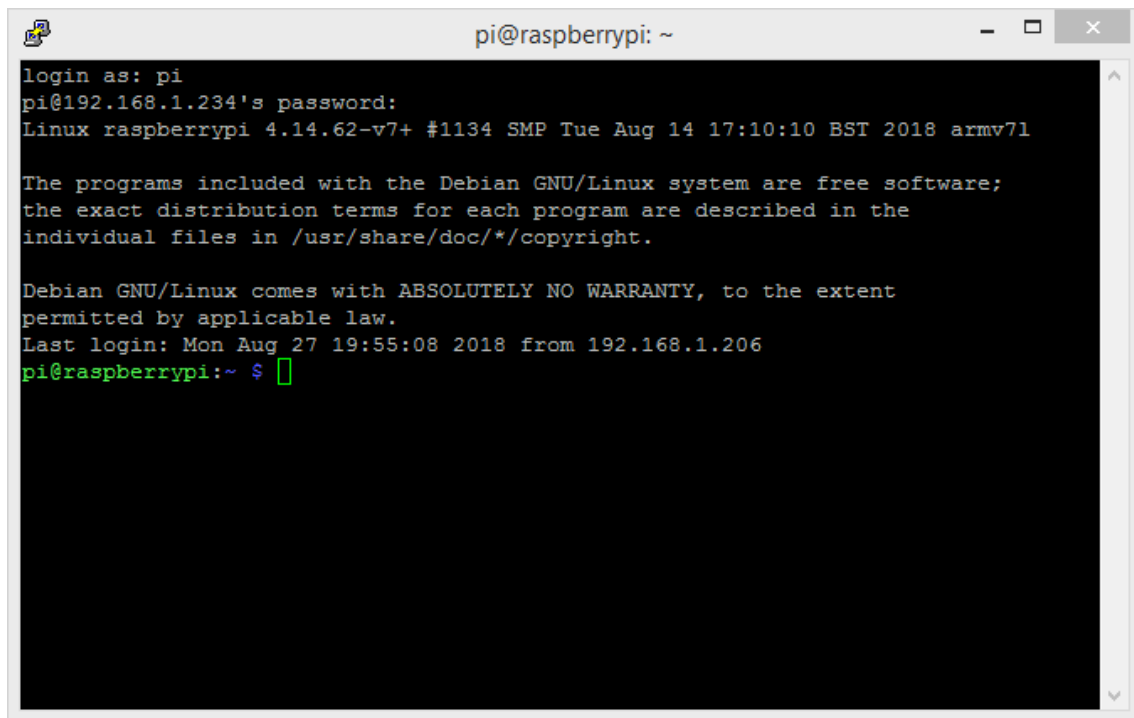


Figura 5.29 Requerimiento de credenciales para acceso SSH



```
login as: pi
pi@192.168.1.234's password:
Linux raspberrypi 4.14.62-v7+ #1134 SMP Tue Aug 14 17:10:10 BST 2018 armv7l

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Mon Aug 27 19:55:08 2018 from 192.168.1.206
pi@raspberrypi:~ $
```

Figura 5.30 Acceso correcto a Raspberry por SSH

Hasta este momento la única conexión existente entre la Raspberry y el ordenador es la conexión SSH que se acaba de iniciar. El siguiente paso es establecer la conexión entre el GCS y la placa FC. Para ello es necesario ejecutar en la Raspberry el comando que hemos introducido en un script anteriormente y que abre el puerto 9000 y acepta conexiones TCP (`./tcplisten.sh`). Una vez ejecutado, ya sea en primer o en segundo plano, ya es posible realizar la conexión. Se accede por tanto al software GCS, se configura adecuadamente la IP de la Raspberry y el puerto y se solicita la conexión. Si todo se ha realizado correctamente, el GCS recibe la telemetría instantánea por parte del FC.

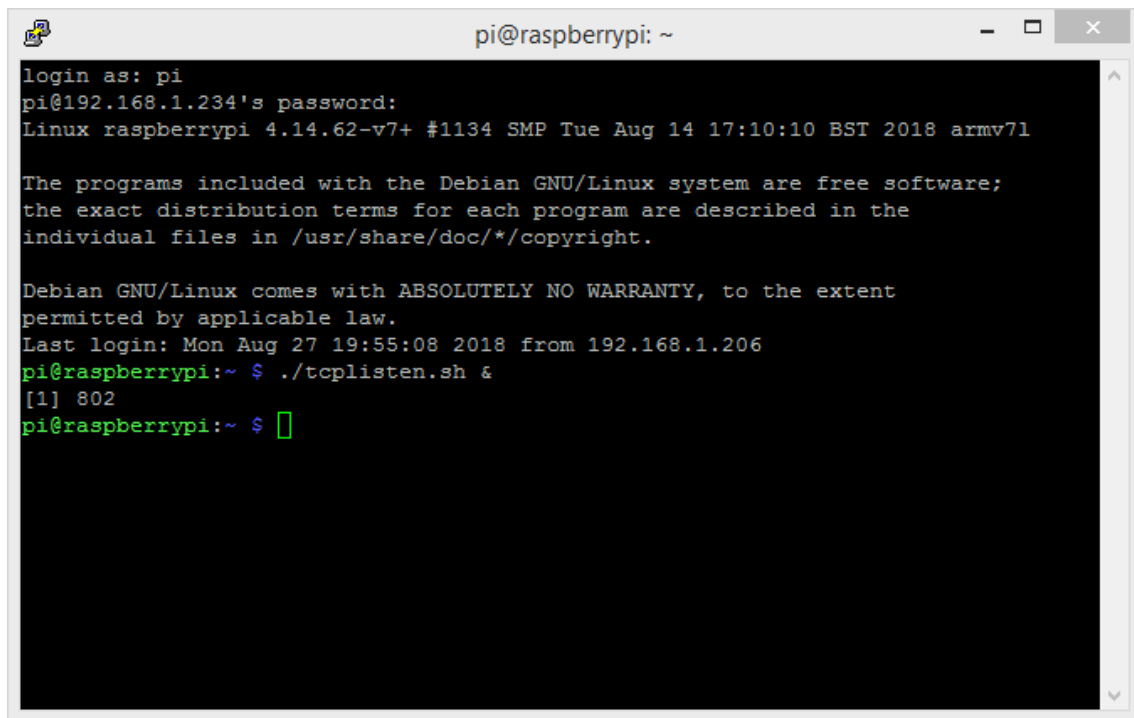


Figura 5.31 Script tcplisten.sh lanzado en segundo plano

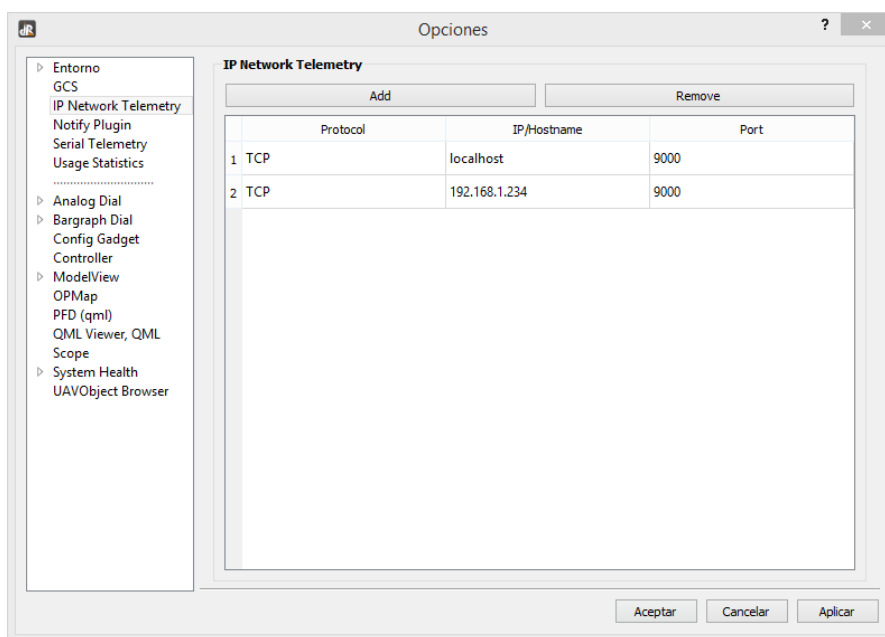


Figura 5.32 Ventana del GCS de configuración con IP de Raspberry añadida

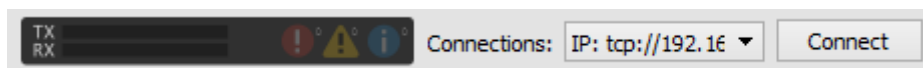


Figura 5.33 IP de Raspberry lista para conectar

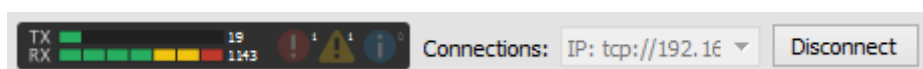


Figura 5.34 Comunicación establecida entre GCS-FC a través de Wi-Fi

#### 5.4. Comunicación a través de la Raspberry PI (LTE).

Una forma de aumentar el rango de acción y que el dron pueda moverse por un territorio más amplio es que éste disponga de Internet móvil. Cualquier teléfono móvil tiene la posibilidad hoy en día de conectarse a Internet en un sitio en el que exista la suficiente cobertura. Esta idea es la que se pretende trasladar al dron y mejorar sus capacidades. Para empezar, es necesario un dispositivo capaz de establecer una conexión 4G y permitir que la Raspberry esté conectada a Internet. Para ello se utiliza un HAT 4G denominado IOT BIT 4G, que se acopla en la parte superior de la Raspberry a través de sus 40 pines disponibles. Es necesario también contar con un proveedor de Internet móvil y adquirir una tarjeta SIM que proporcione acceso a la red. Para ello se valoran las diferentes ofertas existentes en el mercado español en lo relativo al consumo de datos móviles y se concluye que el proveedor más ventajoso en este caso es Simyo. Este ofrece, además del servicio más barato, una tarifa prepago de datos, que puede ser ampliada en el caso de que la transferencia de datos supere lo inicialmente contratado, que se ha decidido que sean 500MB.

Una vez que se contrata el servicio y que se recibe la tarjeta SIM con su correspondiente número de teléfono asociado, ya se dispone de todos los elementos físicos para poder realizar la comunicación 4G.

El siguiente paso es realizar correctamente las conexiones entre el HAT y la Raspberry, teniendo en cuenta que a partir de este momento la alimentación de 5V. se suministra al HAT, y no a la Raspberry, para que éste la distribuya por todo el sistema. Como se aprecia en la imagen, el HAT y la Raspberry se conectan tanto a través de los 40 pines, como a través de USB. El otro puerto microUSB del HAT es el utilizado para alimentar el sistema.



Figura 5.35 Disposición de conexiones del Hat [27]



Una vez integrado el HAT con la Raspberry, es momento de comenzar con la configuración software. En primer lugar, el sistema operativo que se ha instalado en la Raspberry tiene los drivers necesarios para detectar el HAT. Esto se comprueba mediante el siguiente comando.

```
pi@raspberrypi:~ $ lsusb | grep Qualcomm
Bus 001 Device 004: ID 05c6:9000 Qualcomm, Inc. SIMCom SIM5218 modem
```


Figura 5.36 Comprobación y verificación de compatibilidad Hat-Raspberry

El siguiente paso recomendado por el manual de configuración del HAT [27] es realizar los ajustes necesarios en varios ficheros para que la conexión con la red pueda establecerse. Esto se realiza gracias a *wvdial* a través de línea de comandos. A pesar de que esta opción es inicialmente utilizada y la funcionalidad es correcta, se decide posteriormente instalar otro software diferente a *wvdial*, una aplicación gráfica que permite realizar la configuración de la conexión de forma más sencilla e intuitiva que la anterior. Por lo tanto, se procede aquí a explicar la instalación del software elegido para la conexión.

El programa tiene el nombre de Network Manager Gnome y ofrece una interfaz gráfica capaz de configurar adecuadamente los parámetros necesarios para el correcto establecimiento de la conexión 4G deseada. En primer lugar, es necesario proceder a la actualización de repositorios y la instalación del nuevo software.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install network-manager-gnome
```

Figura 5.37 Instalación del software Network Manager Gnome

Una vez instalado, es necesario reiniciar la Raspberry. Cuando esta vuelve a encenderse, un icono del nuevo software  aparece en la barra de herramientas. Mediante el botón derecho, se selecciona en el menú *edit connections*. Una vez que se ha abierto el editor, se pulsa en *add* y se van introduciendo los datos requeridos como se muestra en las siguientes imágenes.

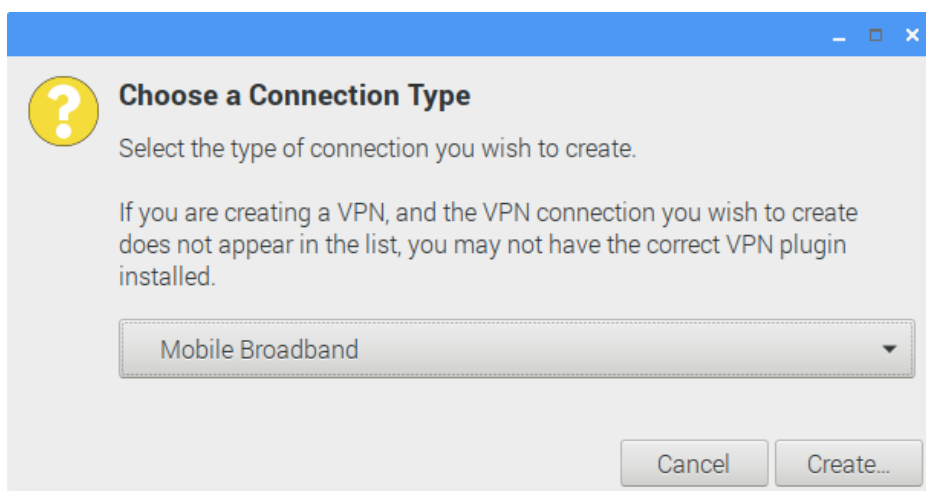


Figura 5.38 Configuración conexión LTE. Tipo de conexión

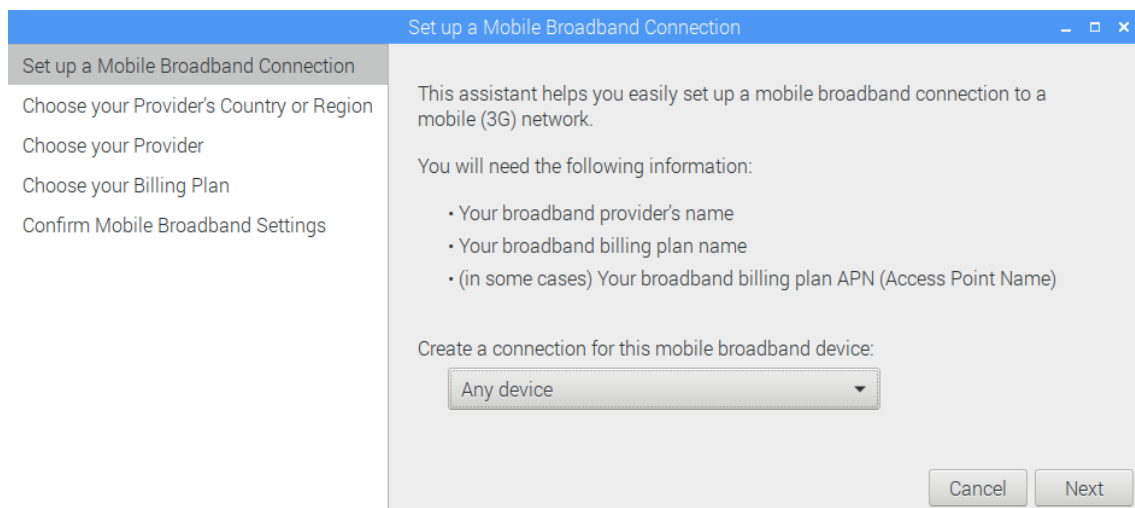


Figura 5.39 Configuración conexión LTE. Tipo de servicio

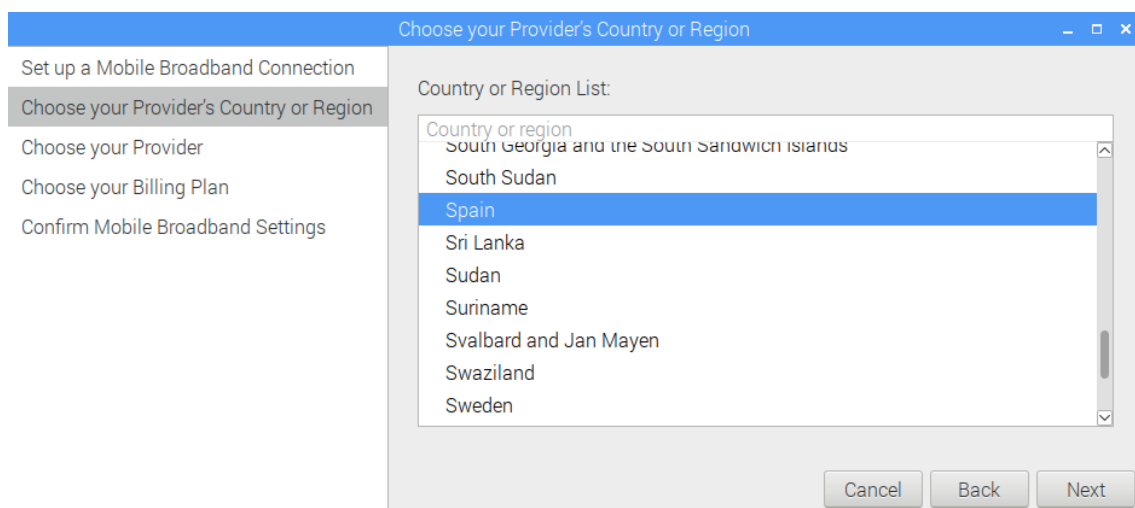


Figura 5.40 Configuración conexión LTE. País

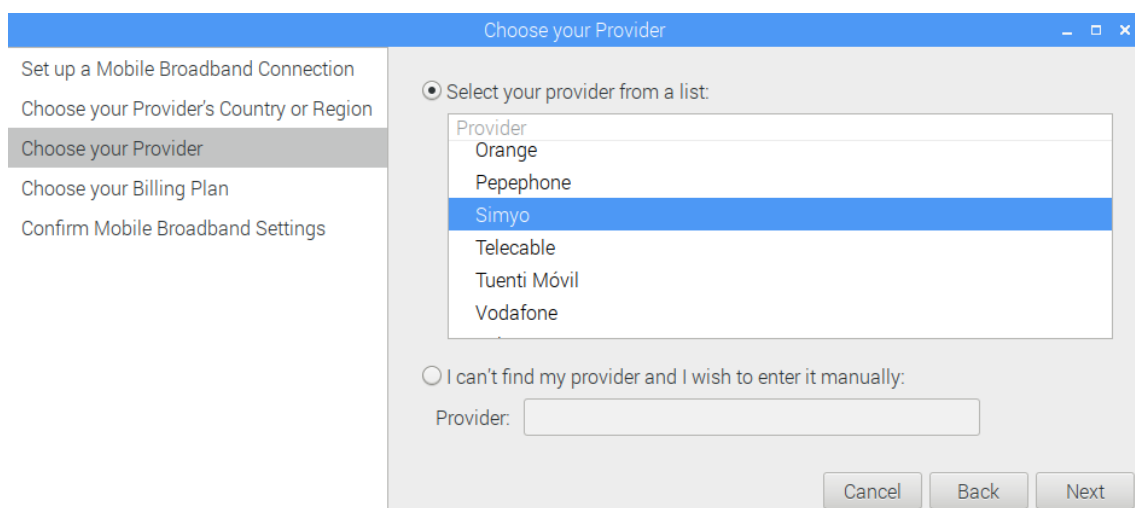


Figura 5.41 Configuración conexión LTE. Proveedor de Internet

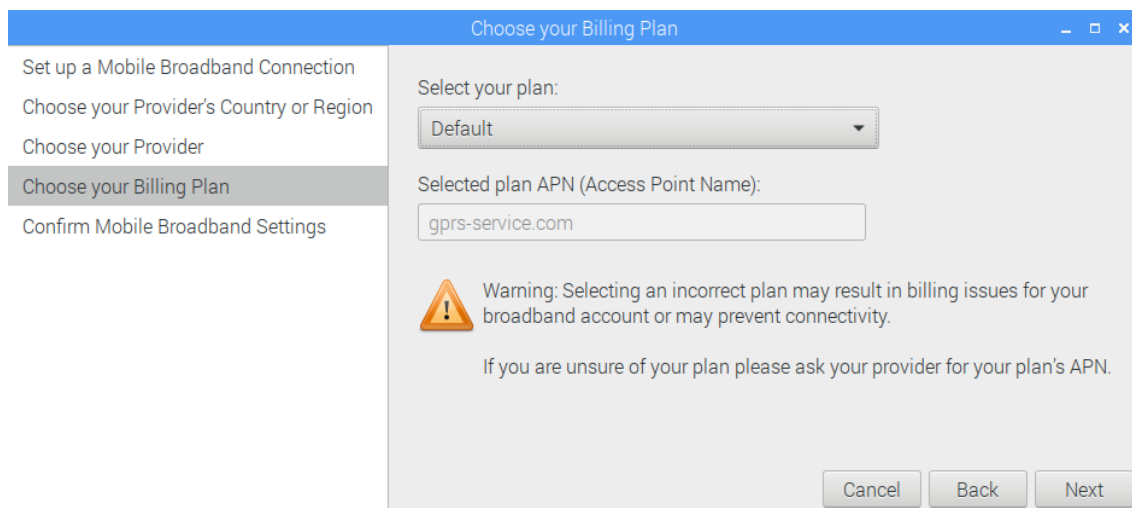


Figura 5.42 Configuración conexión LTE. Facturación y nombre del punto de acceso

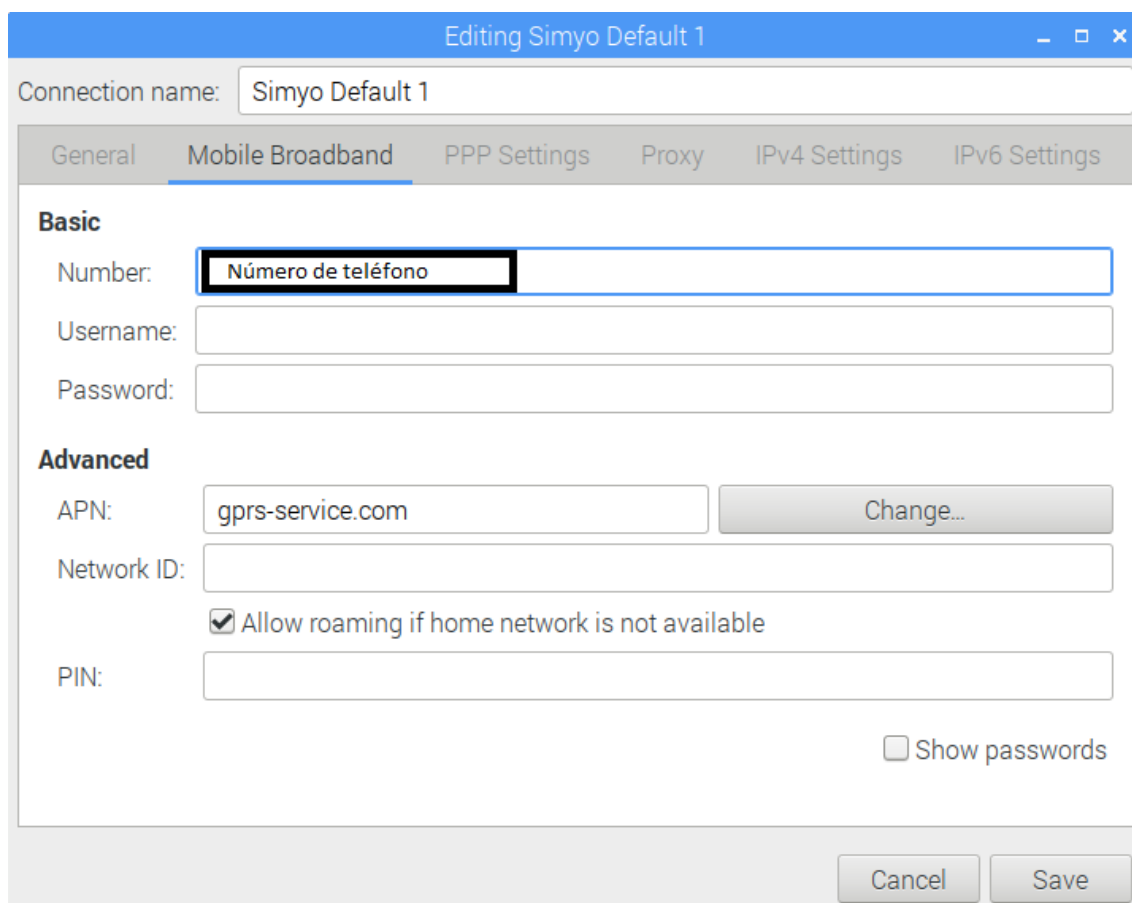


Figura 5.43 Configuración conexión LTE. Número de teléfono

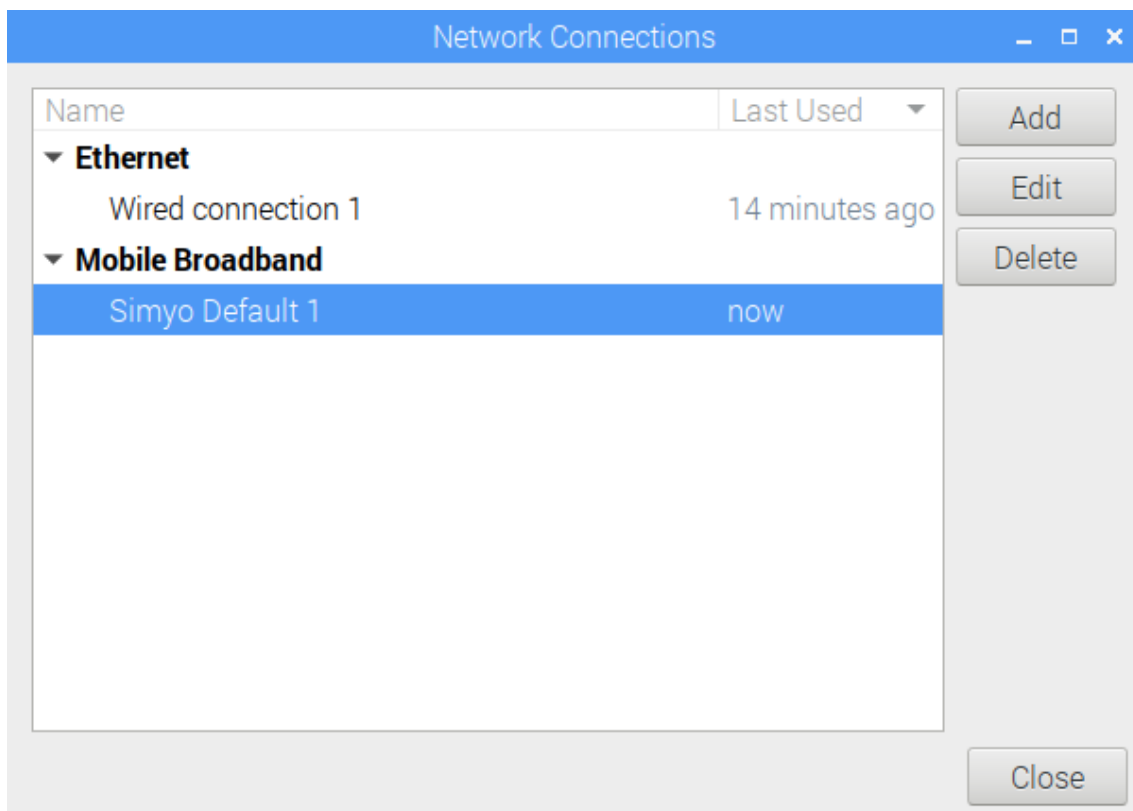



Figura 5.44 Configuración conexión LTE finalizada

Si se encuentra correctamente configurado, la red 4G debe estar disponible y operativa para la posible conexión a la red de Internet. Esto se muestra mediante el icono  en la barra de herramientas.

Una vez que la conexión a Internet se realiza de forma exitosa, el GCS, por su parte, necesita una IP o Hostname y un puerto para llegar a realizar la petición TCP que establece la conexión entre el GCS y el FC del dron. En la configuración Wi-Fi del apartado anterior, los dos equipos se encontraban en la misma subred, accesibles simplemente conociendo su IP. En el caso que ahora se trata, el escenario es diferente. Los proveedores de Internet ofrecen a sus clientes IPs privadas, es decir, no son accesibles desde el exterior simplemente reclamando esa IP. Las IPs públicas son directamente accesibles desde cualquier lugar de la red, pero estas son limitadas. El problema de IPs limitadas se resuelve asignando varias direcciones privadas a una dirección pública. Mediante el método NAT (*Network Address Translation*) es posible traducir una dirección IP pública a otras direcciones IP privadas, y viceversa. Esto es lo que ocurre cuando se conectan dos ordenadores en una red Wi-Fi doméstica. Los dos ordenadores tienen direcciones IP del tipo 192.168.1.X/24, pero estas direcciones no son accesibles como tal, por ejemplo, desde otra red Wi-Fi doméstica, ya que incluso pueden tener la misma IP.

Una vez conocido el problema de acceder a la Raspberry mediante la dupla hostname/puerto, es necesario encontrar algún sistema que permita realizarlo de esta

forma, pues el GCS no tiene otra manera de solicitar una conexión TCP para establecer el intercambio de telemetría. En primer lugar, existe la posibilidad de contratar algún bloque de IPs públicas proporcionadas por algún ISP. Esta opción es utilizada por organismos capaces de sufragar ese gasto extra y de establecer un contrato con la compañía suministradora de Internet. Esta opción aparece por ejemplo en algunos ordenadores de la Universidad Carlos III, accesibles desde el exterior mediante su propia IP. Esta opción es obviamente descartada por dos razones. La primera es que no se precisa de un bloque de direcciones lo suficientemente grande como para contratar este servicio. Y la segunda es que no se dispone del presupuesto necesario para sufragar semejante gasto económico.

Después de descartar esta primera opción, se valora otro servicio que proporciona justo lo que se demanda en este proyecto. Ofrece conexión SSH, VNC, HTTP y otras conexiones personalizadas. Este servicio, llamado *Weaved*, tiene además un apartado dedicado exclusivamente a la configuración en una Raspberry PI. Este es, por tanto, el servicio elegido para realizar la comunicación GCS-FC, por lo que a continuación se explica su funcionamiento, instalación, configuración y uso.

En primer lugar, es necesario registrarse como usuario del servicio en [www.remot3.it](http://www.remot3.it). Se debe proporcionar una dirección de correo electrónico como método identificador. Una vez creada la cuenta y activada mediante un código enviado al correo, la instalación se centra en la Raspberry. La instalación se lleva a cabo mediante el siguiente comando de la imagen.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install weavedconnectd
```

Figura 5.45 Instalación de Weaved

Una vez instalado, se accede a él y se muestran diferentes opciones. En primer lugar, se debe iniciar sesión con la cuenta creada anteriormente.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo weavedinstaller
remot3.it connection installer Version: v1.3-07_Pi lib_v1.3-07_Pi
Modified: December 22, 2017 (library) December 24, 2017

Checking your network for compatibility...

Your network is compatible with remot3.it services.

***** Sign In Menu *****

  1) Sign in to your existing remot3.it account
  2) Request a code for a new remot3.it account
  3) Enter a verification code received in e-mail
  4) Exit

*****

      Use your Weaved account with remot3.it!
*****

Please select from the above options (1-4):
1
```

Figura 5.46 Inicio de sesión en Weaved

Una vez dentro, se escoge la opción de incorporar un nuevo servicio. Se necesita realizar esta operación dos veces, ya que es preciso establecer una conexión SSH entre Ordenador-Raspberry y otra TCP entre GCS-FC. La conexión SSH es denominada “SSH” y se deja en el puerto por defecto, el 22. La conexión TCP entra dentro de las personalizables, por lo que hay que especificar que se trata del protocolo “tcp”, se realiza la petición al puerto 9000 y se nombra la conexión “TCP\_9000”.

```
Getting HWID: 4a:67:11:5a:c6:ef-tUM9SJV9XSQMxjKuIOuS
Updating /etc/weaved/services/Weavedrmt365535.conf
.
===== Installed remot3.it Services =====
Protocol      Port      Service      remot3.it Service Name
-----
Device Name: droninrpi
=====
***** Main Menu *****

1) Attach/reinstall remot3.it to a Service
2) Remove remot3.it attachment from a Service
3) Remove all remot3.it attachments, then exit
4) Exit

*****
Please select from the above options (1-4):
1
```

Figura 5.47 Procedimiento para añadir un servicio nuevo

```
***** Protocol Selection Menu *****

1) SSH on port 22
2) Web (HTTP) on port 80
3) VNC on port 5900
4) Custom (TCP)
5) Return to previous menu

*****

You can change the port value during install
*****

Please select from the above options (1-5):
1
You have selected: 1.

The default port for SSH is 22.

Would you like to continue with the default port assignment? [y/n] y
We will attach a remot3.it connection to the following service:

Protocol: ssh
Port #: 22
.....

Enter a name for this remot3.it service (e.g. SSH-Pi).
This name will be shown in your remot3.it Service List.

Only letters, numbers, underscore, space and dash are allowed.

SSH
Getting HWID: 4a:67:11:5a:c6:ef-tUM9SJV9XSQMxjKuIOuS
.
Registering SSH....
```

Figura 5.48 Establecimiento del servicio SSH

```
***** Protocol Selection Menu *****

1) SSH on port 22
2) Web (HTTP) on port 80
3) VNC on port 5900
4) Custom (TCP)
5) Return to previous menu

*****

You can change the port value during install
*****

Please select from the above options (1-5):
4
You have selected: 4.

Does this protocol use a web browser (e.g. HTTP on port 8080 vs. 80) [y/n] n
Please enter the protocol name (e.g., ssh, http, nfs):
tcp
Please enter your desired port number (1-65535):9000
We will attach a remot3.it connection to the following service:

Protocol: tcp
Port #: 9000
.....

Enter a name for this remot3.it service (e.g. SSH-Pi).
This name will be shown in your remot3.it Service List.

Only letters, numbers, underscore, space and dash are allowed.

TCP_9000
Getting HWID: 4a:67:11:5a:c6:ef-tUM9SJV9XSQMxjKuIOuS
.
Registering TCP_9000...
```

Figura 5.49 Establecimiento del servicio TCP

Una vez que se han configurado las conexiones que se desean, ya es posible establecer la comunicación. En primer lugar, es necesario que la Raspberry esté conectada a Internet y, en segundo lugar, iniciar sesión en el ordenador, en [www.remot3.it](http://www.remot3.it), con el mismo correo que se ha venido introduciendo anteriormente. Una vez en la pantalla de inicio, aparece el dispositivo de la Raspberry listo para usar. Se hace click sobre él y se abre una nueva ventana con las opciones disponibles que se han configurado anteriormente en la Raspberry, es decir, “SSH” y “TCP\_9000”. Se debe establecer la conexión SSH para abrir el puerto 9000 mediante el script creado en apartados anteriores (`./tcplisten.sh`), puesto que se ha decidido que no se abra automáticamente. Cuando se selecciona la conexión SSH, aparecen un nombre de host y un puerto, que serán los encargados de redirigir la conexión al puerto 22 de la Raspberry. Por lo tanto, y como en el apartado anterior, se inicia el programa Putty y se introduce el nombre de host y puerto facilitado por el servicio. Si todo ha ido correctamente, después de introducir el nombre de usuario y contraseña de la Raspberry PI, la conexión SSH es efectiva.

Cuando la conexión SSH se ha establecido correctamente, se introduce el comando para ejecutar el script que pone a la escucha el puerto 9000 de la Raspberry. Seguidamente se vuelve al ordenador y se activa la conexión TCP\_9000. Al igual que con SSH, aparecen un nombre de host y un puerto, esta vez encargados de redirigir la conexión al puerto 9000 de la Raspberry. Este nombre de host y puerto deben introducirse en el GCS para

poder realizar la solicitud TCP siguiendo las siguientes instrucciones: Herramientas → Opciones... → IP Network Telemetry. Se guardan cambios y en el menú de conexiones del GCS debe aparecer la nueva dirección introducida. Se selecciona esta última y la conexión GCS-FC se establece mediante 4G, permitiendo la movilidad total del dron por el espacio aéreo con cobertura de datos móviles.

| <input type="checkbox"/> | Status | Device Name | Share | HWID                                   | Internal IP   | External IP |
|--------------------------|--------|-------------|-------|--|---------------|-------------|
| <input type="checkbox"/> | ✔      | droninrpi   |       | 4a:67:11:5a:c6:ef-tUM9SJv9XSQMxjKuIOuS | 10.30.150.223 | 90.174.2.44 |

Figura 5.50 Establecimiento de conexión LTE (1)

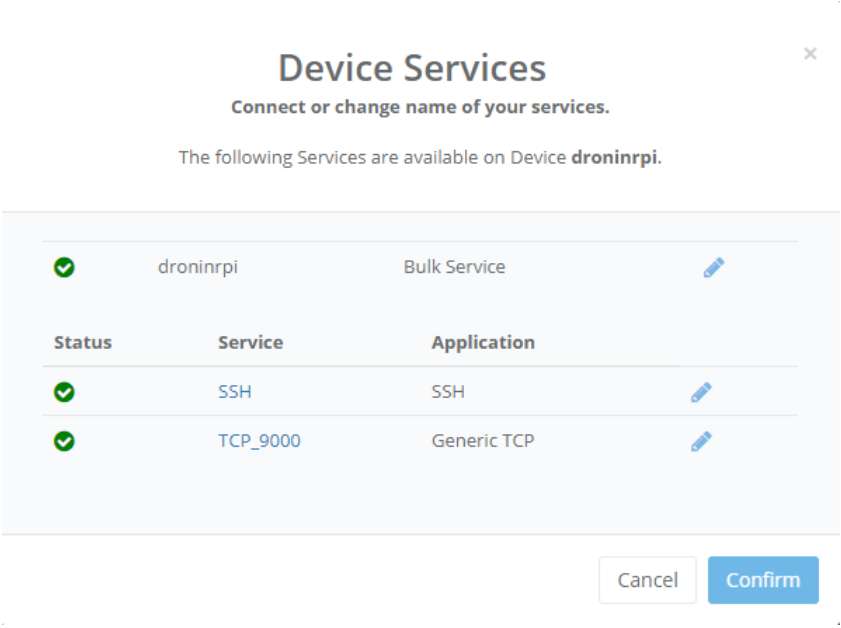


Figura 5.51 Establecimiento de conexión LTE (2)



## SSH Connection

Your SSH connection to SSH is ready.

Use the following options in your SSH client application.

Copy and paste these values to your SSH application:

proxy50.rt3.io

39939

Or, copy and paste one of these command lines into your terminal window, based on your SSH username:

|                   |                                      |
|-------------------|--------------------------------------|
| For pi username   | ssh -l pi proxy50.rt3.io -p 39939    |
| For root username | ssh -l root proxy50.rt3.io -p 39939  |
| All others *      | ssh -l LOGIN proxy50.rt3.io -p 39939 |

\* Replace LOGIN with your device login name.

[Click here](#) for additional help

Back

Close

Figura 5.52 Establecimiento de conexión LTE (3)

## TCP Connection

Your TCP connection to **TCP\_9000** is ready to use. Use the following options in your TCP client application.

Copy and paste the values below to your client application:

proxy53.yoics.net

37083

Or use this single connection string in your client application:

proxy53.yoics.net:37083

Back

Close

Figura 5.53 Establecimiento de conexión LTE (4)

## **6. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **6.1. Primera comprobación de vuelo.**

La primera comprobación de vuelo se realiza con los componentes básicos y necesarios. No se incorporan por tanto los módulos adicionales de GPS o medidor de la batería, así como tampoco la estructura completa de la Raspberry. El vuelo se realiza en campo abierto en unas condiciones atmosféricas favorables y durante un corto periodo de tiempo, sin llegar a agotar la autonomía de una batería. La primera prueba resulta exitosa en modo de vuelo *Leveling* y por tanto se concluye que las conexiones y configuración de los distintos componentes se han realizado correctamente. Puede observarse una fotografía de esta prueba en el Anexo A (Figura 0.3)

### **6.2. Vuelo completo y Autotune**

El vuelo completo se realiza ya con todos los equipamientos sobre el dron, con el objetivo de observar su comportamiento real. Se realiza en un espacio cerrado sin posibles agentes externos, como puede ser el viento, y se observa un buen comportamiento en sus movimientos y en su potencia. Es un vuelo corto que no llega a sobrepasar los 5 minutos.

En el mismo espacio y con la misma batería, se procede a realizar el vuelo de autoconfiguración o Autotune que pretende establecer unas condiciones óptimas de control de estabilización al dron. Se realiza en el mismo espacio cerrado y tiene una duración de 1 minuto. Posteriormente se conecta el dron al GCS y se establece la configuración calculada automáticamente mediante Autotune.

### **6.3. Vuelo tras Autotune**

El vuelo inmediatamente posterior a la realización del Autotune se realiza en campo abierto. Es el primer vuelo que se realiza en campo abierto con todos los sistemas en funcionamiento, ya que en interiores el GPS no recibe señal.

Este vuelo se monitoriza mediante telemetría Wi-Fi. Para ello se establece como punto de acceso un terminal móvil, al que se conectan la Raspberry y el ordenador. Tras realizar los pasos necesarios, la telemetría aparece en el GCS del ordenador. Toda la telemetría y posicionamiento GPS de la ubicación del dron son correctos y por lo tanto se procede a realizar el despegue.

La nueva configuración después de realizar el Autotune se observa un tanto inestable en los primeros momentos de vuelo. Tras unos instantes el dron pierde el control de sí mismo y se precipita al suelo desde una altura de aproximadamente 4 metros. El sistema de batería de la Raspberry y su estructura, así como los sistemas de amortiguación para el aterrizaje quedan dañados por el golpe y se retiran del dron para su correcta reparación.

Aún con la configuración anterior, se procede a realizar otro vuelo en interior sin la integración aún de la estructura de la Raspberry y se concluye que la configuración realizada después de haber realizado el Autotune de dRonin se percibe bastante inestable y poco segura. Los movimientos del dron simulan turbulencias que no aparecían con la configuración anterior y por tanto se procede a restaurar los parámetros de configuración anteriores a la realización del Autotune.

#### 6.4. Vuelo con módulo GPS integrado

Para la comprobación del funcionamiento del GPS, se realiza un vuelo con telemetría Wi-Fi. El objetivo es el de determinar la precisión del GPS y si se actualiza con la suficiente frecuencia como para ver en un mapa su situación actual. Para la observación en un mapa, se crea un *Workspace* nuevo en el GCS con el que se pretende visualizar la ubicación del dron en tiempo real. Para ello, en el menú Herramientas→Opciones...→GCS, se incluyen 5, en vez de los 4 anteriores *Workspaces*.

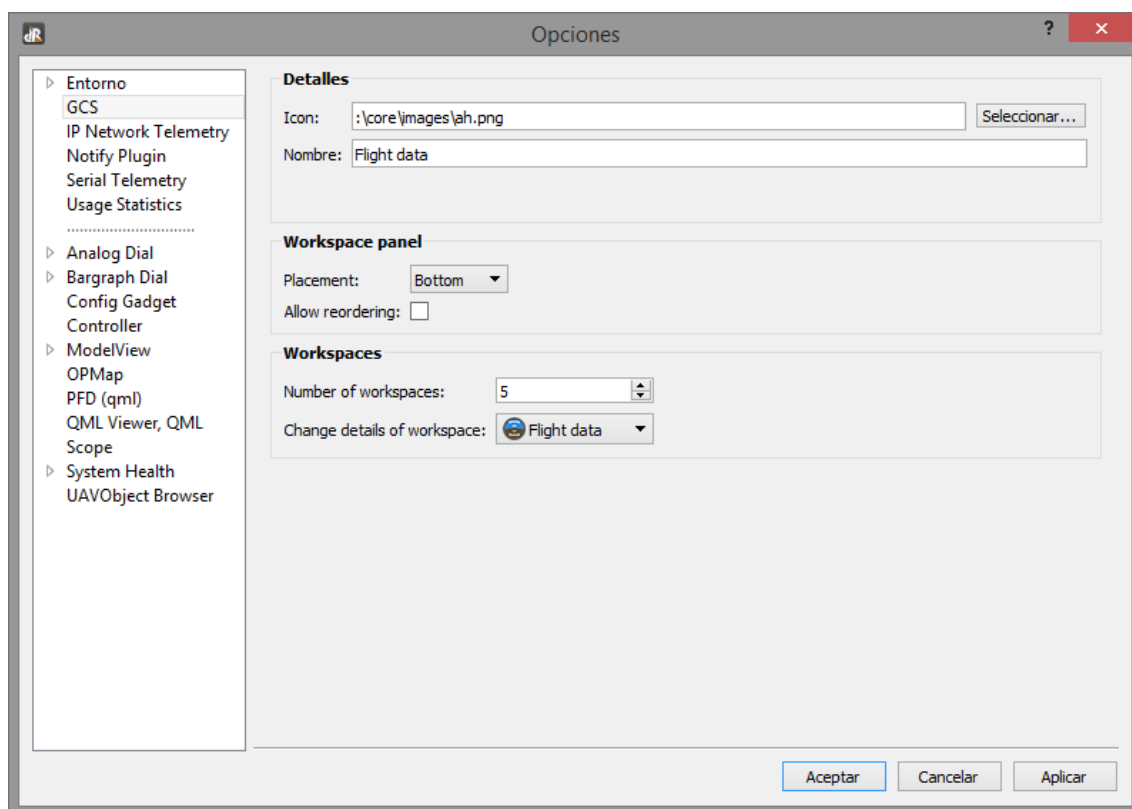


Figura 6.1 Ventana de configuración del entorno GCS

Una vez creado el *Workspace*, se selecciona el modo OPMap, que es el que muestra el mapa deseado.

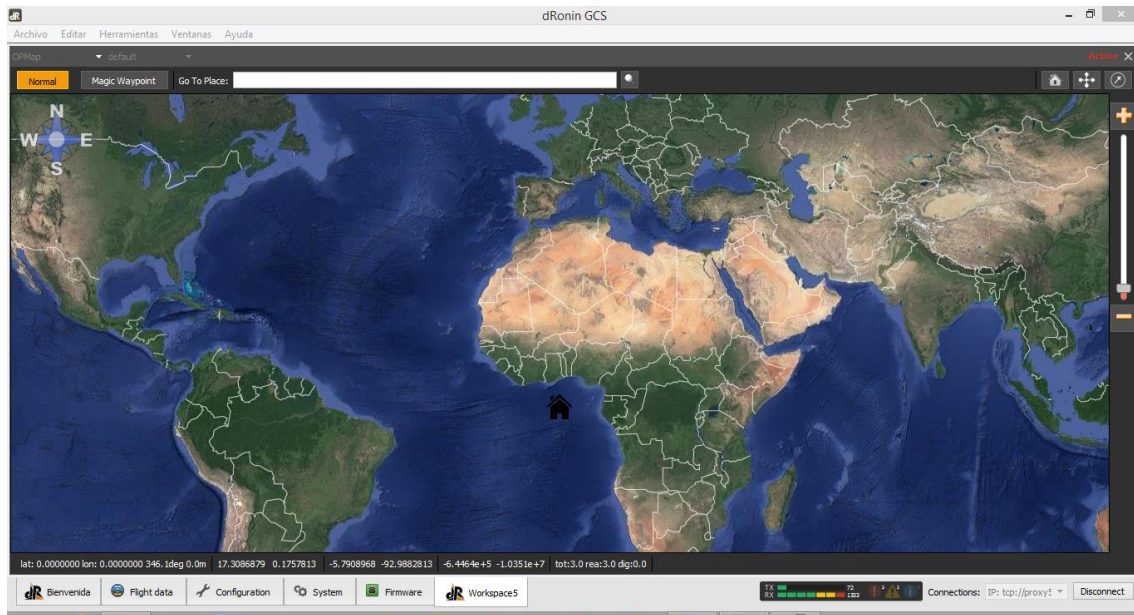


Figura 6.2 Mapa del GCS antes de señal GPS

Una vez que se tiene esta vista, cuando el dron recibe señal GPS, se establece el lugar *Home* en ese punto. Cuando el dron despegue, se pueden seguir fácilmente sus movimientos mediante los puntos y líneas que marcan su trayectoria.

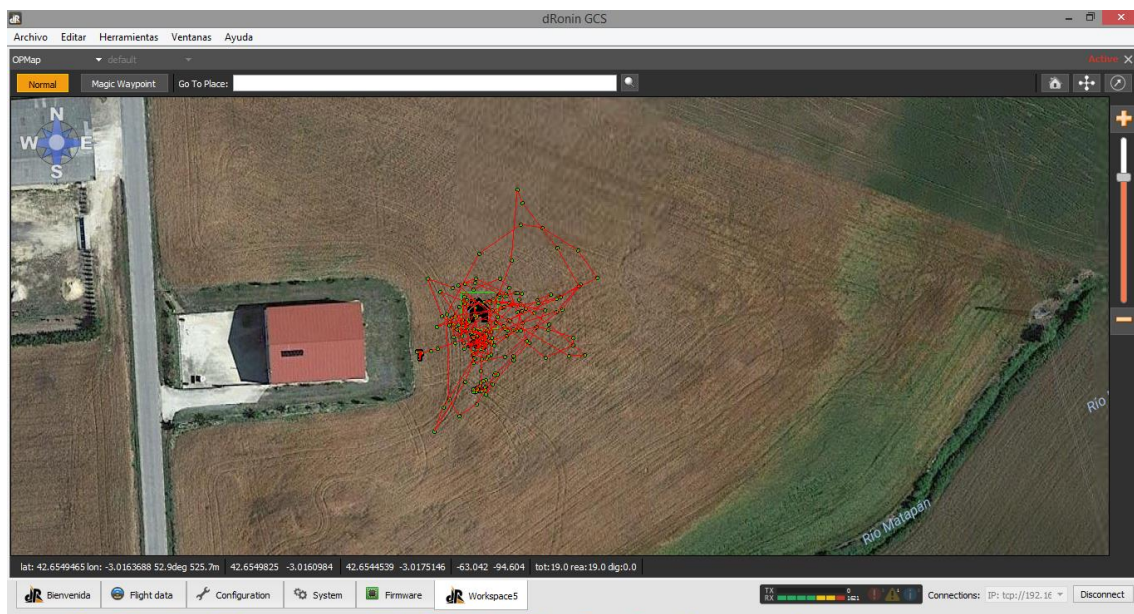


Figura 6.3 Mapa del GCS después de vuelo con GPS

En la imagen se aprecian los movimientos que ha realizado el dron en un vuelo con el GPS en funcionamiento. El vuelo, como se ha mencionado anteriormente, ha sido monitorizado por Wi-Fi, además de haber permanecido en contacto con la Raspberry mediante una conexión SSH.

Además de tener el control visual del dron mediante su ubicación, también existe la opción de personalizar los *Workspaces* y monitorizar otros parámetros como la brújula, barómetro, número de satélites disponibles en tiempo real, horizontalidad del dron, etc. El fin de cada vuelo determina qué tipo de funciones se necesitan observar y por tanto el usuario debe modificarlo atendiendo a sus necesidades.

## 6.5. Vuelo con funcionalidad GPS

Una vez comprobada la fiabilidad del posicionamiento ofrecido por el módulo GPS, se incorpora alguna funcionalidad que permita controlar el dron con ayuda de la ubicación proporcionada por este.

Para ello es necesario calibrar correctamente los sensores del FC para asegurar una buena estabilización en el control del dron. Esto se realiza en la pestaña *Sensor Settings* de la opción de configuración *Attitude*. Además, en la misma opción, pero en la pestaña *Filter Settings*, se configuran las opciones como se muestra en la imagen.

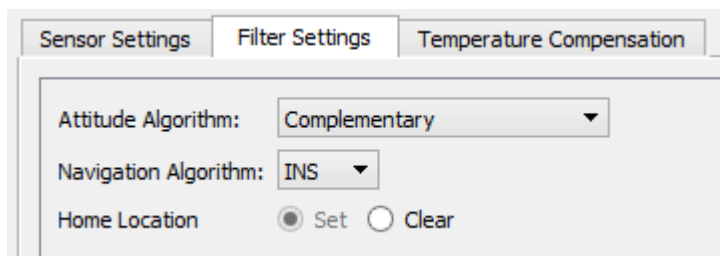


Figura 6.4 Pestaña Filter Settings



Attitude

Figura 6.5 Icono Attitude de la vista Configuration

Una vez hecho esto, es necesario habilitar el módulo *VTOLPathFollower*.

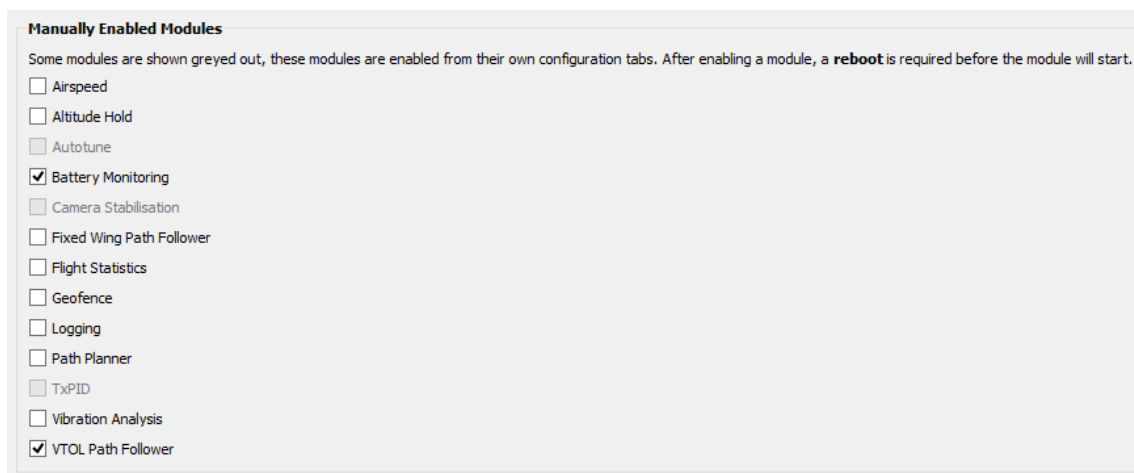


Figura 6.6 Lista de módulos activos en la configuración del FC

Con esta configuración ya puede realizarse el modo de vuelo *PositionHold*, en la que el dron mantiene la posición anterior a entrar en este modo. El otro modo de vuelo disponible con esta configuración es el de RTH (*Return to Home*), que consiste en un

vuelo autónomo por parte del dron y aterrizaje en el lugar de despegue. Para la prueba de ambas posibilidades se configuran en pruebas diferentes los modos de vuelo de la emisora de la siguiente forma:

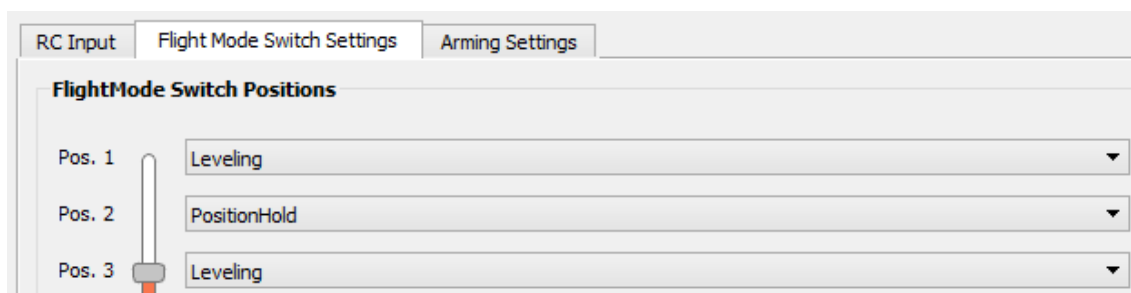


Figura 6.7 Pestaña de configuración de modos de vuelo. Modo 2 activo con PositionHold

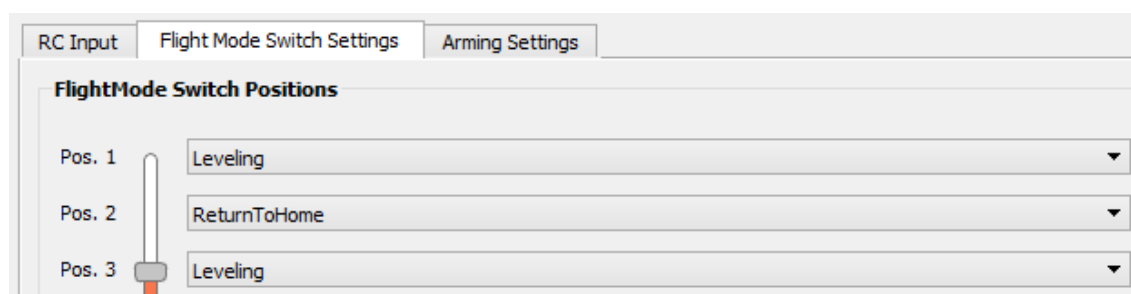


Figura 6.8 Pestaña de configuración de modos de vuelo. Modo 2 activo con ReturnToHome

A pesar de que se dispone de tres posiciones y lógicamente se pueden colocar ambas en las posiciones 2 y 3, por seguridad las posiciones 1 y 3 se dejan en modo de vuelo *Leveling*, que es el control manual. El interruptor de la emisora tiene 3 posiciones y por tanto los extremos de este serán vuelo manual.

Cabe destacar que con esta configuración no es posible armar el dron hasta que exista señal GPS válida y por lo tanto no es posible realizar pruebas en interiores.

Las pruebas de estos modos de vuelo no se han realizado completamente y por tanto no se pueden extraer unas conclusiones muy determinantes acerca del funcionamiento del sistema. Las pruebas que se han realizado han sido en exteriores, nunca en un tiempo atmosférico con ausencia total de viento y por tanto el dron no ha obtenido unos resultados muy exitosos en cuanto a su control autónomo. Las oscilaciones de posición cuando este debe permanecer inmóvil varían en un radio de unos 5 metros, un resultado que debe ser bastante mejorado si se requiere que dicha funcionalidad sea exacta. Estas oscilaciones son producto del software de vuelo, puesto que la precisión GPS es perfecta y el magnetómetro se encuentra bien configurado.

## 6.6. Ancho de banda ofrecido

Se procede a realizar una prueba de ancho de banda disponible, comparando dos escenarios. Cuando se encuentra activa la telemetría y cuando solo existe una conexión



SSH. Así es posible determinar cuánto ancho de banda o qué porcentaje de la conexión se está perdiendo en concepto de envío de telemetría.

Para realizar estas mediciones se utiliza el software *iperf*. Se instala en la Raspberry y en el ordenador que posee el GCS. La Raspberry actúa como servidor y el ordenador como cliente.

Las mediciones con la conexión SSH activa son las mostradas en la siguiente imagen.

```
pi@raspberrypi:~ $ iperf -s
-----
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 85.3 KByte (default)
-----
[  4] local 192.168.43.234 port 5001 connected with 192.168.43.206 port 49458
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[  4]  0.0-60.1 sec   161 MBytes  22.5 Mbits/sec
[  5] local 192.168.43.234 port 5001 connected with 192.168.43.206 port 49462
[  5]  0.0-60.2 sec   149 MBytes  20.8 Mbits/sec
[  4] local 192.168.43.234 port 5001 connected with 192.168.43.206 port 49466
[  4]  0.0-60.1 sec   154 MBytes  21.4 Mbits/sec
```

Figura 6.9 Resultados de ancho de banda con conexión SSH activa

Por su parte, con la conexión TCP establecida para telemetría, el ancho de banda es el siguiente.

```
pi@raspberrypi:~ $ iperf -s
-----
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 85.3 KByte (default)
-----
[  4] local 192.168.43.234 port 5001 connected with 192.168.43.206 port 49468
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[  4]  0.0-60.1 sec   167 MBytes  23.3 Mbits/sec
[  6] local 192.168.43.234 port 5001 connected with 192.168.43.206 port 49470
[  6]  0.0-60.1 sec   158 MBytes  22.1 Mbits/sec
[  4] local 192.168.43.234 port 5001 connected with 192.168.43.206 port 49472
[  4]  0.0-60.1 sec   149 MBytes  20.8 Mbits/sec
```

Figura 6.10 Resultados ancho de banda con conexiones SSH y TCP activas

Como se muestra en los resultados, no se aprecian diferencias notables en ambos casos. Es muy importante tener en cuenta que, si se observa el GCS, este muestra la velocidad de transmisión y recepción de datos entre el FC y él mismo, es decir, el ancho de banda utilizado por la telemetría. La recepción en el GCS suele situarse en torno a los 1.500 Bytes/segundo, y la transmisión, en torno a los 30 Bytes/segundo. Comparando el ancho de banda medido que ofrece la red con el ancho de banda que consume la telemetría, se concluye que la telemetría no afecta (tan solo supone un 0.01%) al ancho de banda útil para realizar otras operaciones con la Raspberry. Por tanto, el sistema es muy eficiente, puesto que no resta capacidades a las comunicaciones que se establezcan a posteriori.

## 7. GESTIÓN DEL PROYECTO

### 7.1. Planificación

El proyecto ha tenido una duración total de siete meses, desde febrero hasta agosto. La planificación de este se ha realizado mediante un diagrama de Gantt, expresando cada actividad a realizar y su correspondiente periodo de tiempo en el que se desarrolla. Se ha intentado cumplir de la forma más rigurosa posible la planificación y se han obtenido los resultados anteriormente descritos en esta memoria. A continuación, se encuentra la tabla con el diagrama y las principales actividades desarrolladas, en la que se marca con color verde el periodo de tiempo dedicado a cada actividad.

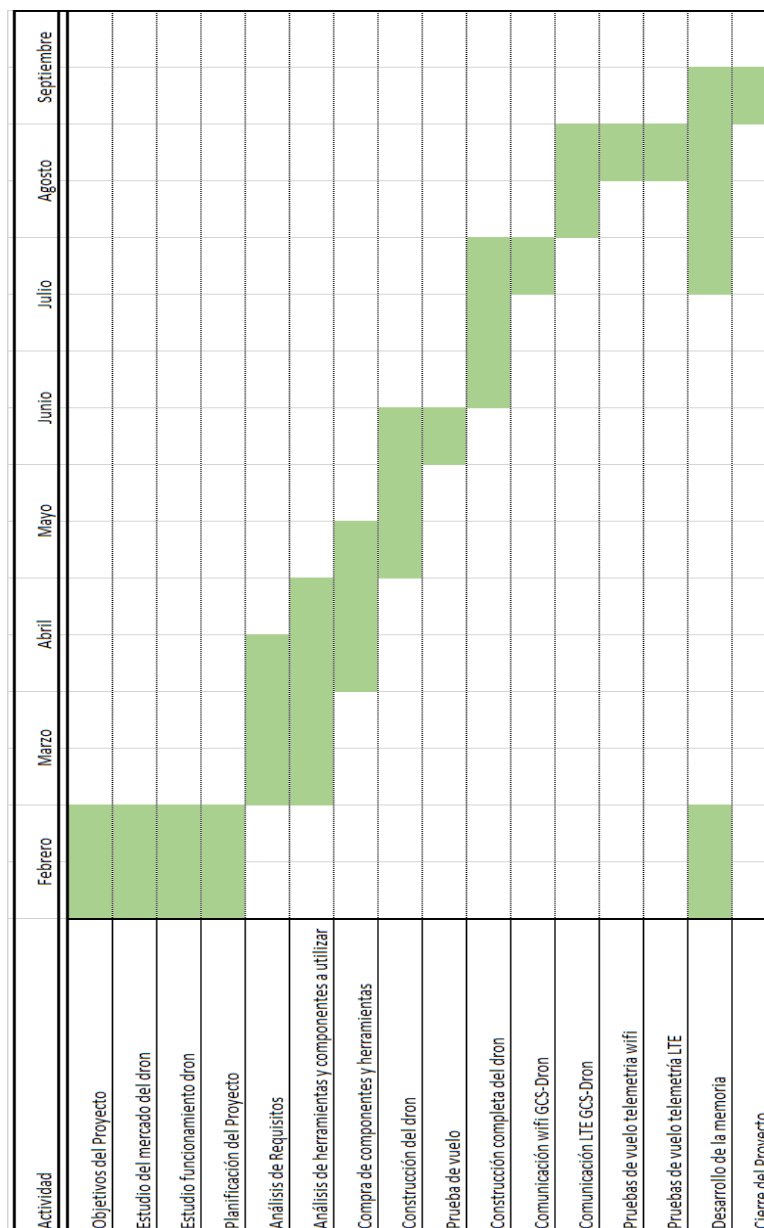


Figura 7.1 Diagrama de Gantt. Planificación del proyecto



## 7.2. Presupuesto

El presupuesto del proyecto se encuentra detallado en las siguientes tablas. Se ha considerado, además del coste físico del proyecto, el tiempo empleado en su desarrollo. El tiempo teórico estipulado para el desarrollo de este proyecto, según el sistema de créditos, es de aproximadamente 576 horas. Calculando el tiempo empleado, a una media de 3 horas al día en los meses entre febrero y mayo (excluyendo fines de semana y festivos) y de 5 horas al día entre junio y agosto (incluyendo fines de semana y festivos), resulta un total de aproximadamente 690 horas empleadas. Se ha considerado un sueldo de 10.58 €/hora [28], siendo ingeniero junior con funciones de telecomunicaciones e informática.

Tabla 7.1 PRESUPUESTO DE LOS COMPONENTES PARA EL DESARROLLO DEL SUAS

| Componentes                   |          |         |         |
|-------------------------------|----------|---------|---------|
| Concepto                      | Cantidad | Precio  | Total   |
| Dji F450 Frame                | 1        | 11,85 € | 11,85 € |
| OpenPilot CC3D Revolution     | 1        | 46,87 € | 46,87 € |
| ESC Simonk30A (4uds)          | 1        | 14,92 € | 14,92 € |
| A2212/13T 1000Kv Motor (4uds) | 1        | 15,11 € | 15,11 € |
| Turnigy TGY-i6 AFHDS Tx/Rx    | 1        | 46,09 € | 46,09 € |
| Ublox NEO-M8N GPS             | 1        | 16,15 € | 16,15 € |
| Turnigy 5000mAh 3S 20C Lipo   | 2        | 21,72 € | 43,44 € |
| E3 SKYRC Cargador 3S          | 1        | 11,73 € | 11,73 € |
| Cable XT60 12AWG (4uds)       | 1        | 7,99 €  | 7,99 €  |
| E-prop 10x5 (CW) (2uds)       | 4        | 2,03 €  | 8,12 €  |
| E-prop 10x5 (CCW) (2uds)      | 4        | 2,03 €  | 8,12 €  |
| Cable JST-XH 3S               | 1        | 0,41 €  | 0,41 €  |
| Cinta sujeción fácil 20mmx1m  | 1        | 3,00 €  | 3,00 €  |
| Cinta aislante 19mmx20m       | 1        | 0,87 €  | 0,87 €  |
| 50 Bidas 100x2,5mm            | 1        | 0,55 €  | 0,55 €  |
| 100 Bidas 295x3,6mm           | 1        | 4,96 €  | 4,96 €  |
| Curve 5200mAh                 | 1        | 14,99 € | 14,99 € |
| Conectores Banana (4uds)      | 3        | 0,99 €  | 2,97 €  |
| Resistencia 1MOhmio           | 4        | 0,20 €  | 0,80 €  |
| Varilla roscada 5mm           | 1        | 0,72 €  | 0,72 €  |
| Rueda plástico                | 1        | 0,28 €  | 0,28 €  |
| Tuerca 5mm                    | 2        | 0,02 €  | 0,04 €  |
| Tuerca autoblocante 5mm       | 1        | 0,05 €  | 0,05 €  |
| Arandela 5mm                  | 2        | 0,05 €  | 0,10 €  |
| Tuerca expansible latón 5mm   | 1        | 0,05 €  | 0,05 €  |
| Cable microUSB-USB            | 1        | 4,00 €  | 4,00 €  |

|                             |   |          |                 |
|-----------------------------|---|----------|-----------------|
| Placa fibra de carbono      | 1 | 3,50 €   | 3,50 €          |
| Cinta de velcro con pasador | 1 | 3,50 €   | 3,50 €          |
| Raspberry PI 3              | 1 | 35,66 €  | 35,66 €         |
| IOT Bit 3G Hat              | 1 | 250,00 € | 250,00 €        |
| Estructura Raspberry        | 1 | 12,00 €  | 12,00 €         |
| Tarjeta SIM                 | 1 | 10,00 €  | 10,00 €         |
| <b>TOTAL</b>                |   |          | <b>578,84 €</b> |

Tabla 7.2 PRESUPUESTO DE LAS HERRAMIENTAS DE CNSTRUCCIÓN PARA EL SUAS

| Herramientas de construcción |          |          |                 |
|------------------------------|----------|----------|-----------------|
| Concepto                     | Cantidad | Precio   | Total           |
| Tercera mano con lupa        | 1        | 5,75 €   | 5,75 €          |
| Blister Estaño 40 gramos     | 1        | 2,15 €   | 2,15 €          |
| Soldador 40W Electrónica     | 1        | 7,30 €   | 7,30 €          |
| Alicates                     | 1        | 6,00 €   | 6,00 €          |
| Ordenador gama media         | 1        | 480,00 € | 480,00 €        |
| Multímetro digital           | 1        | 10,99 €  | 10,99 €         |
| Teclado USB                  | 1        | 14,99 €  | 14,99 €         |
| Ratón USB                    | 1        | 6,99 €   | 6,99 €          |
| Monitor HDMI                 | 1        | 36,00 €  | 36,00 €         |
| <b>TOTAL</b>                 |          |          | <b>570,17 €</b> |

Tabla 7.3 PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA

| Mano de Obra |          |         |                   |
|--------------|----------|---------|-------------------|
| Concepto     | Cantidad | Precio  | Total             |
| Mano de obra | 690      | 10,58 € | 7.300,20 €        |
| <b>TOTAL</b> |          |         | <b>7.300,20 €</b> |

Tabla 7.4 PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| <b>SUMA TOTAL PROYECTO</b> | <b>8.449,21 €</b> |
|----------------------------|-------------------|

## **8. CONCLUSIONES**

### **8.1. Objetivos cumplidos.**

Los objetivos iniciales del proyecto, descritos en el apartado 1.2 del presente documento, han sido las principales referencias en cuanto al trabajo realizado y a la dirección de los esfuerzos empleados. Cabe destacar que la totalidad de los objetivos han sido correctamente alcanzados, debiendo dejar constancia en este apartado algunas deficiencias que se han producido.

La comunicación LTE que se establece entre el ordenador y la Raspberry del dron se desarrolla con total normalidad y eficiencia durante unos instantes de tiempo, pero, tras un periodo de tiempo variable (entre 2 y 10 minutos), esta comunicación finaliza debido a que la Raspberry se reinicia automáticamente. Este reinicio ocurre tras unos segundos en los que el led rojo del HAT LTE se enciende. Inicialmente se han considerado varias causas que podrían forzar el reinicio de la Raspberry. Una mala configuración para la conexión a la red, una mala alimentación del sistema o un defecto en el HAT LTE. Las tres posibles causas han sido abordadas mediante la instalación de un nuevo software que automatiza más la configuración de red, una fuente de alimentación que es capaz de proporcionar más potencia de la requerida y hasta el reemplazo del HAT LTE por otro nuevo. Las tres acciones han resultado inútiles en cuanto a evitar el indeseado reinicio y por lo tanto queda apuntado en este apartado para futuras pruebas.

### **8.2. Consideraciones futuras en proyectos similares**

El proyecto que se ha desarrollado ha conllevado una serie de riesgos, la mayoría de ellos influyentes sobre la planificación del proyecto y su duración temporal.

Los materiales y componentes necesarios, en primer lugar, han sido adquiridos en su mayoría en China para rebajar costes y por lo tanto el tiempo de envío no es un factor que haya podido ser controlado por la dirección del proyecto.

Un segundo riesgo a tener en cuenta es el posible fallo del sistema desarrollado, puesto que se trata de un objeto volador de un peso considerable que puede precipitarse al vacío y ser destruido en un instante. Por lo tanto, el fallo de este sistema no tiene el mismo impacto que, por ejemplo, un software aislado en pruebas.

Teniendo en cuenta estos riesgos y considerando que todos ellos han aparecido en el actual proyecto, se concluye que la planificación futura de un proyecto similar al actual debe ser bastante permisiva con los tiempos de desarrollo y prueba, ya que éstos se ven gravemente lastrados.

La planificación inicial del proyecto comenzó siendo bastante optimista, por lo que se rediseñó enseguida, acomodándose mejor a los plazos verdaderamente alcanzables.

### **8.3. Futuras líneas de trabajo.**

El trabajo que se ha desarrollado en esta memoria es simplemente la base para futuros proyectos de investigación que necesiten realizar pruebas en determinadas áreas geográficas. Ofrece la posibilidad de colocar una Raspberry en el aire y realizar cualquier tipo de operación sobre ella, a la vez que se monitorea el estado y telemetría del dron sobre el que se encuentra. El proyecto pretende facilitar la posibilidad de llevar al aire cualquier tipo de dispositivo que pueda ser conectado a una Raspberry y desarrollar pruebas o experimentos. En un primer momento, el proyecto se pretende enfocar en un futuro despliegue de redes, mediante una nube de drones que las provean. Sin embargo, las utilidades del proyecto pueden abarcar un campo mucho más amplio dependiendo del propósito deseado. Hay que tener en cuenta que se dispone de un ordenador en vuelo, al que se le pueden conectar todo tipo de dispositivos USB, lo que multiplica las utilidades del dron. Algunas líneas de desarrollo, además del despliegue de redes, podrían ser la grabación de vídeo desde el aire, ya sea con fines de vigilancia o de reconocimiento del terreno, la obtención de datos atmosféricos o la simple detección de la velocidad de vehículos que circulan por un tramo determinado de carretera. Existe un mercado en plena expansión y por tanto este proyecto pretende facilitar la libre implantación de cada vez más sistemas de este tipo, limitado únicamente por la normativa vigente en España, que será siempre la que determine el radio de acción de los drones, al menos a corto plazo.

## ANEXO A. IMÁGENES DEL DRON

En este anexo se muestran algunas de las imágenes tomadas durante el desarrollo del proyecto. Pretenden ayudar a comprender un poco mejor la situación de cada componente, así como a obtener una idea general sobre el dron realizado.

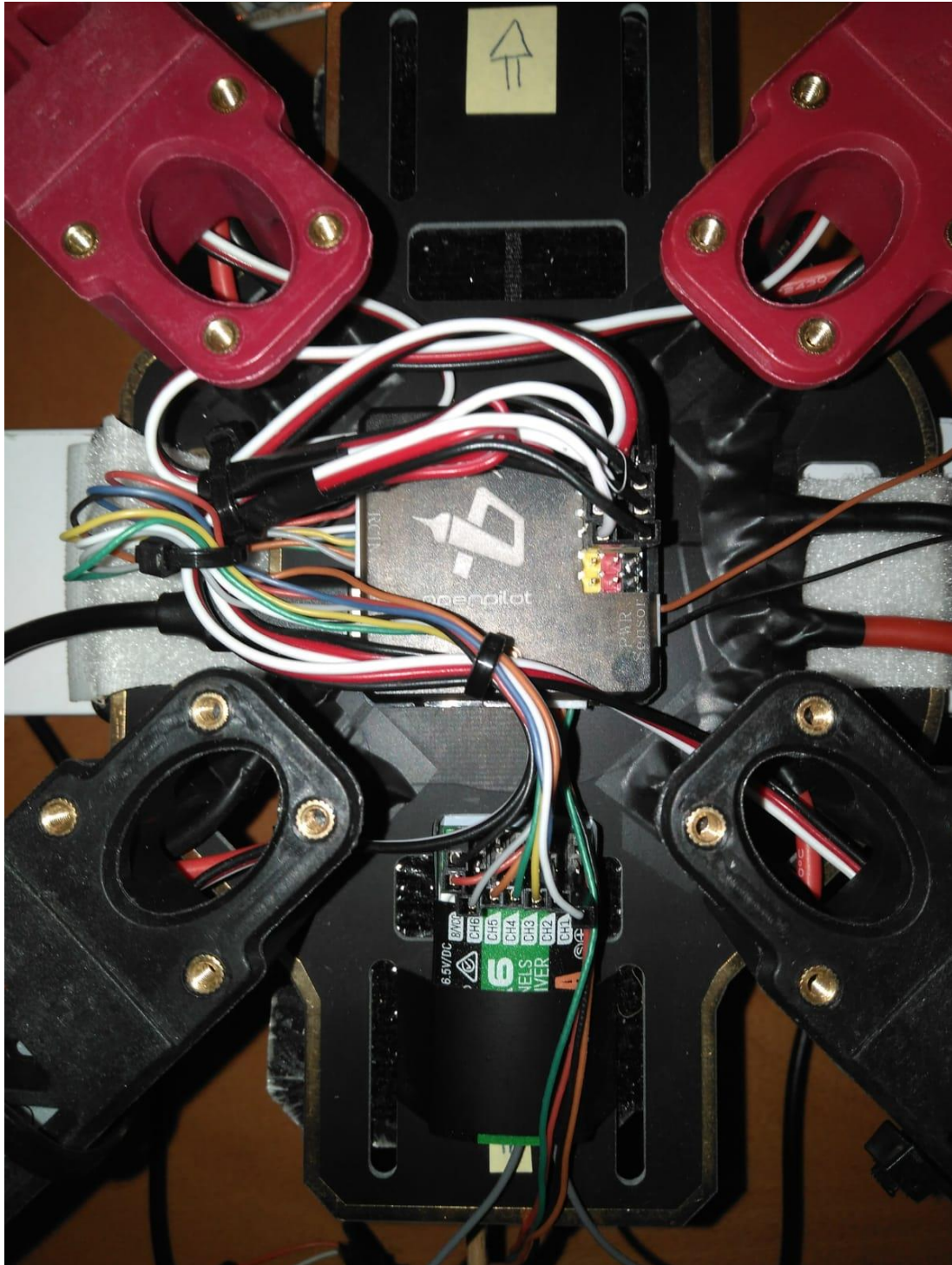


Figura 0.1 Núcleo del dron. FC y receptor

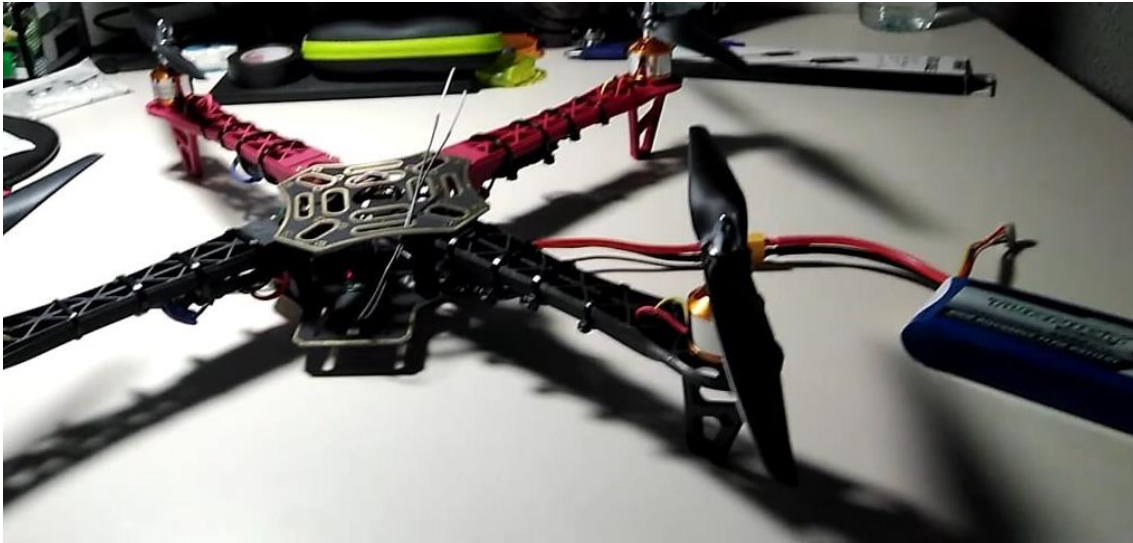


Figura 0.2 Dron con los componentes básicos



Figura 0.3 Primer vuelo de prueba con componentes básicos



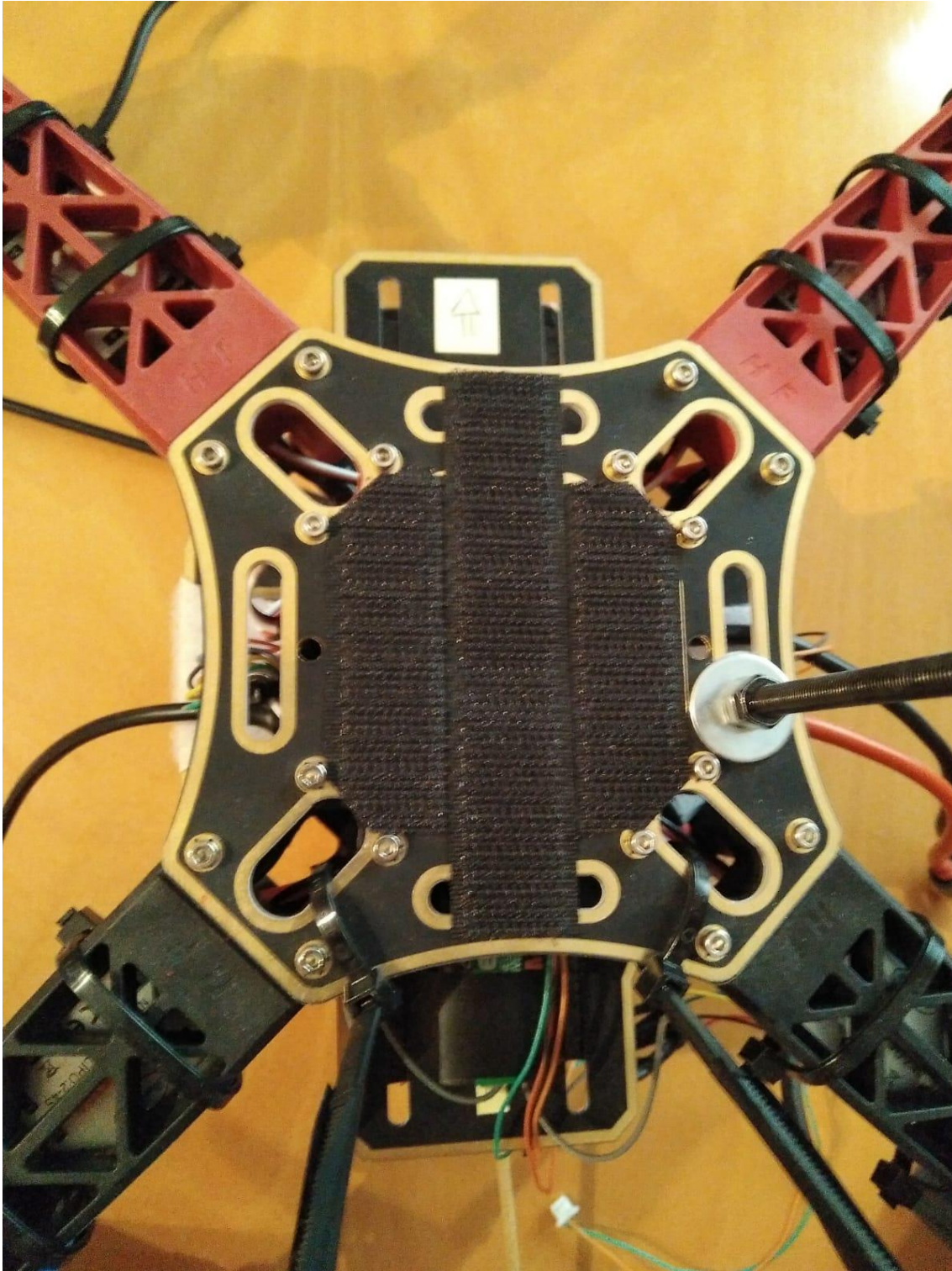


Figura 0.4 Estructura del dron con GPS instalado y preparado para la instalación de la Raspberry



Figura 0.5 Primera instalación de la Raspberry



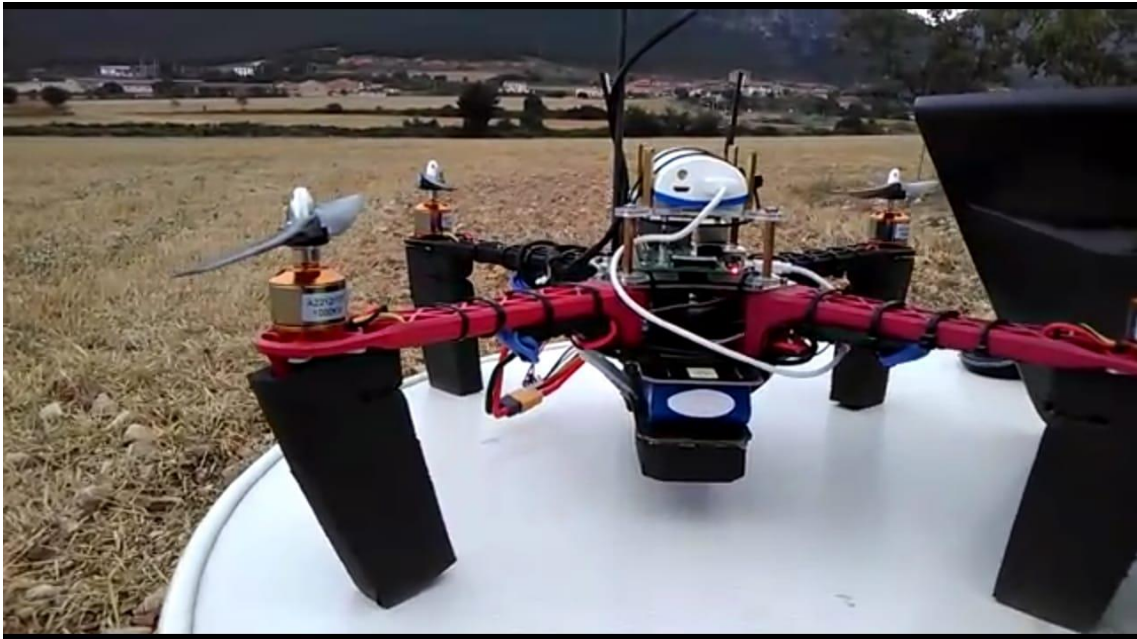


Figura 0.6 Dron con componentes preparados para vuelo con telemetría wireless

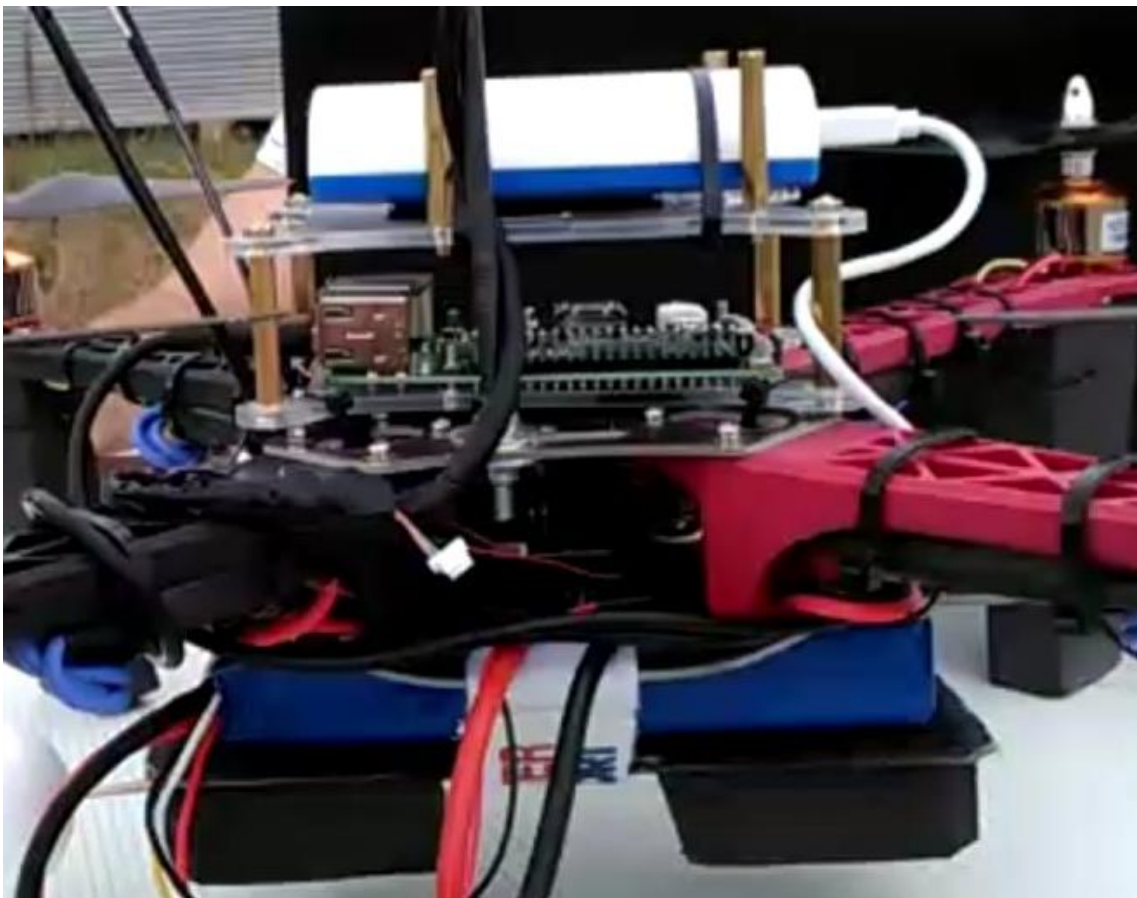


Figura 0.7 Detalle del núcleo del dron



Figura 0.8 Despegue con telemetría wireless



Figura 0.9 Vuelo con telemetría wireless

## **ANEXO B. SUMMARY IN ENGLISH**

This annex has the purpose of making a short summary of all the work done in this Project and exposing it.

Nowadays, drones and communication networks are two of the most researched topics. The development of drones in new areas in which they were not being used is starting to transform the way in which factories and companies work. Looking after large areas, using new technologies in agriculture or accessing to complicated places and participating in rescue missions are some of the tasks that are currently being done successfully thanks to the great improvement that drones have experienced in the last few years. Even the transport of people have been involved in these ideas, thinking about if it could be profitable to make it through this type of technology. This investigation area, therefore, is in full development and expansion, which makes it possible to investigate new possibilities and challenges that can be faced to improve the activities that are carried out in areas that nowadays have nothing to do with drones.

On the other hand, communication networks are also experiencing a great development. The future arrival of 5G seems to be a great revolution in society. Communication networks are going to become the fundamental pillar on which society works, if it is not already, and its maintenance and continuous improvement will be very important.

The IoT or Internet of Things will have an even greater importance in the near future than nowadays and will allow the society to live better and the processes to be more automated. Places where Internet does not reach will be extensions without any interest, since any activity will not be done normally.

Taking the two concepts and integrating them, the one of drones and the one of communication networks, the motivation of this Project arises.

Sometimes, the idea of deploying a communication network in a certain geographical area can be difficult due to several factors. One factor may be the time that the network needs to be there for its use. This can happen, for example, in large meetings with millions of people. In this case, the deployment of a new network should be low cost to be feasible. Another situation in which it would be necessary to deploy a new network in a short period of time would be in the case of any type of catastrophe that leaves people without communications. It would be necessary to provide a reliable communication network as soon as possible in order to be able to solve the problems that exist there as a result of the catastrophe itself.

All these problems motivate the solution proposed in this work, which is nothing else than the construction of a SUAS (Small Unmanned Aerial System) capable of transporting a small computer on board, able to communicate with any other system that requires it. The objective is to provide support to carry out research activities. An activity,

for example, could be a large swarm of drones connected to each other and establishing a useful communications network from the ground to be able to exchange information.

It is also necessary to take in count the law and its restrictions. In fact, drones cannot fly everywhere. The Spanish law about drones has changed this last year and is improving the way in which drones can be flight. Nevertheless, drones cannot fly themselves, without anybody taking control of it. This is slowing down the develop of these systems but is always a security issue. Taking these restrictions in count, it is possible to develop the Project in a safety environment, without taking any risk that could have these tests.

The Project has followed a strict order to achieve the objectives described below and to be able to make annotation of the progress achieved. The main objective is to implement a drone to support research activities. For this purpose, different partial objectives that lead to the main one are considered:

- ➔ Use of free software technologies.
- ➔ Integration in the drone of a platform with enough computing capacity and memory to establish wireless communications and transmit the data required by the developed system.
- ➔ Enabling communication channels to control the drone and exchange data between the drone and other drones or platforms on land considering different access technologies.

For the correct achievement of the objectives, it is intended to carry out the following activities or steps:

- ➔ Economic purchase of the necessary parts of the construction of the drone.
- ➔ Election and installation of the flight software of the controller board and verification of its operation.
- ➔ Construction of the drone structure and execution of necessary welds.
- ➔ Basic construction of the drone to make possible its first test flight.
- ➔ Get a stable and controlled flight of the drone with its basic structure.
- ➔ Complete construction of the drone with additional features such as GPS and battery monitor.
- ➔ Test of complete functionalities and verification through the GCS (Ground Control Station).
- ➔ Integration of a computer in the structure of the drone.
- ➔ Establishment of SSH Wireless connection between drone and computer through Wi-Fi.
- ➔ Establishment of TCP Wireless connection between FC (Flight Controller) and GCS through Wi-Fi.
- ➔ Establishment of SSH Wireless connection between drone and computer through LTE.
- ➔ Establishment of TCP Wireless connection between FC (Flight Controller) and GCS through LTE.

- ➔ Test to determine the bandwidth offered by the computer on board the dron.

Once the objectives are clear, it is necessary to proceed with the selection of components and tools that are necessary for its development. The components and tools that have been used, after determining which are the best ones, are in the following list:

- ➔ Flight controller software. dRonin software makes the dron flying stable.
- ➔ FC board. CC3D Revolution board has the necessary ports and sensors to make the dron fly and to reach the objectives of this Project.
- ➔ Motors and propellers. BLDC A2212/13T motor and 10X5 propellers have been chosen for the drone.
- ➔ ESC or Electronic Speed Controllers. These ESC control the speed of motors. ESC Simonk-30A are the four chosen.
- ➔ Transmitter and receiver Turnigy TGY-i6 are chosen for this Project.
- ➔ GPS NEO-M8N is the module used to determine the position of the drone and work with that information.
- ➔ Raspberry PI Model B is the computer used on board the dron and is in charge of establishing any type of communication from the ground to the drone.
- ➔ Structure of the drone. DJI450 is the frame chosen for the development of the system, which comes with an integrated PDB (Power Distribution Board) that helps to power the ESC without additional circuits.
- ➔ Batteries. There are two batteries, one for the flight systems and another one in charge of Raspberry PI systems. The one in charge of flight is 5000mAh and the other one is 5200mAh.
- ➔ Chargers. The Li-Po battery needs to be charged by a special charger, so a 3S Li-Po battery is bought to take care of the battery. The other one is charged by USB.
- ➔ Principal tools that have been used are a tin soldering iron, some tin, a structure to hold cables while soldering them, a multimeter, a screwdriver and some pliers.
- ➔ Software tools to work with are the computer, with Windows 8.1 and the GCS installed on it, this last one provided by dRonin.

The development of the drone is made with the tools described above. The first test to show that it flies correctly is made with the absolutely necessary modules to do it and afterwards is when the Raspberry, the GPS and other modules are installed.

The Raspberry and its battery are installed on the top of the frame onto a cluster specially designed for Raspberry. It is attached to the frame and connected with the FC through USB to establish the communication with GCS.



The GPS module is installed above all the systems of the drone to have a better GPS signal and avoid electromagnetic fields caused by motors rotation.

Once everything is installed on the drone, it has from down to top of the drone core: the battery in charge of the flight, the FC and receiver, the Raspberry PI, its battery and the GPS module at the top. Components which are not on the core as ESC or motors are placed on the arms of the frame.

The communication between GCS and FC is established through the Raspberry PI. First, it is necessary to have an SSH connection between the computer in which is installed the GCS and the Raspberry on board the drone. Next, the Raspberry links a TCP port with its USB port, thanks to socat software, and then the GCS can ask about that TCP port and establish the connection with the FC to get the telemetry link.

This is made in a Wi-Fi network but it is possible to make it with LTE. For that purpose, it is necessary to get a Hat LTE which makes it possible to have Internet connection everywhere in the Raspberry PI. It is installed in the Raspberry and, having a SIM card to have Internet connection, it is ready to connect. Afterwards and thanks to software Weaved, it provides a proxy server to connect to Raspberry through LTE. The operation is the same as before. First, it is needed a SSH connection and then the TCP connection. The telemetry link then would be established.

Several tests have been made through the development of the Project and the majority of them have succeed. The first ones were to confirm that all the systems had been installed correctly and worked perfectly.

This flight software had an autotune mode but it did not work well so it was decided to fly with the default settings that looked stable.

Tests about GPS worked fine. It was possible to establish a Wi-Fi link telemetry and observe how the position of the GPS changed while the drone was flying. It has a very good precision and it works properly.

Afterwards it was tested GPS functionalities such as Position Hold and Return to Home, which have to be improved because they are a bit imprecise.

Bandwidth tests show that the system is very competitive because only 0.01% of it is used for telemetry and SSH connection between GCS and FC, having 99,99% to use for another investigation purposes, which is the aim of the Project.

To sum up, it is necessary to say that all objectives have been achieved, although some of them have had some issues.

To calculate the budget of the Project, it has been considered, in addition to the physical cost of it, the time spent in its development. The theoretical time stipulated for the development of this project, according to the credit system, is approximately 576 hours. Calculating the time spent, at an average of 3 hours a day in the months between February

and May (excluding weekends and holidays) and 5 hours a day between June and August (including weekends and holidays), results in a total of approximately 690 hours employed. If a salary of 10.58 €/hour is considered it results on 7.300,20€. Components have had a cost of 578,84 € and tools 570,17 €. If all costs are added, the Project has had a total budged of 8.449,21 €.

The project that has been developed has had a series of risks, most of them related with the planning of the project and its temporal duration.

The necessary materials and components, first of all, have been purchased mostly in China to reduce costs and therefore the shipping time is not a factor that could have been controlled by the project management.

A second risk to take into account is the possible failure of the developed system, since it is a flying object of considerable weight that can fall down and be destroyed completely. Therefore, the failure of this system does not have the same impact as, for example, software in tests.

Taking into account these risks and considering that all of them have appeared in the current project, it is concluded that the future planning of a project similar to the current one should be quite permissive with the development and testing times.

The work that has been developed in this project is simply the basis for future research projects that need to perform tests in certain geographic areas. It offers the possibility of placing a Raspberry in the air and perform any type of operation on it, while monitoring telemetry of the drone on which it is located. The project aims to offer the possibility of bringing to the air any type of device that can be connected to a Raspberry and develop tests or experiments. The project is intended to focus on a future deployment of networks, through a cloud of drones that provide it. However, project utilities can cover a much larger field depending on the desired purpose. Keep in mind that it is a computer in flight, to which you can connect all kinds of USB devices, which multiplies the profits of the drone. Some lines of development, in addition to the deployment of networks, could be the recording of video from the air, obtaining atmospheric data or simply detecting the speed of vehicles passing through the road. There is a market in full expansion and therefore this project aims to offer a implementation that brings in future more and more systems of this type, limited only by the regulations in Spain, which will always determine the radius of action of the drones, at least short term.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. McFarland, "Uber teams with NASA to make flying cars a reality", *CNN tech*, 08-05-2018. [En línea]. Disponible en: <https://money.cnn.com/2018/05/08/technology/uber-nasa/index.html>
- [2] J. Bush, "DJI Phantom 5 Pro Quadcopter Wishlist of New Features", *Fstoppers*, 27-08-2018. [En línea]. Disponible en: <https://fstoppers.com/drone/dji-phantom-5-pro-quadcopter-wishlist-new-features-193299>.
- [3] Vehículo aéreo no tripulado, Wikipedia, 08-08-2018. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo\\_a%C3%A9reo\\_no\\_tripulado](https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_a%C3%A9reo_no_tripulado)
- [4] E. Santana, "Tipos de drones – Conoce todos los tipos de drones que existen | Clasificación de drones | Categorías de drones” *XDRONES*, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.xdrones.es/tipos-de-drones-clasificacion-de-drones-categorias-de-drones/>
- [5] Dron para toma de imágenes aéreas, *aeroexpo*. [En línea]. Disponible en: <http://www.aeroexpo.online/es/prod/alpha-unmanned-systems/product-175258-29476.html>
- [6] Traxco "Aplicaciones de los drones para agricultura", *Traxco*, 01-02-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.traxco.es/blog/noticias-agricolas/drones-para-agricultura>
- [7] J. Lee Harper, "Drones de EE.UU., ‘protagonistas’ de operaciones militares en África", *RT*, 18-05-2013. [En línea]. Disponible en: <https://actualidad.rt.com/actualidad/view/94781-drones-eeuu-africa-mali-reaper-francia>
- [8] J. Soto Silva, "La Moral y la Ética en el uso de aviones no tripulados (Uav) como armas letales", *Academia Nacional de Estudios Políticos y Estratégicos – Ministerio de Defensa Nacional*, 28-11-2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.anepe.cl/la-moral-y-la-etica-en-el-uso-de-aviones-no-tripulados-uav-como-armas-letales/>
- [9] J. Cristila, "Airbone collision avoidance system market report till 2024 by decisiondatabases", *Red Newswire*, 16-01-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.rednewswire.com/airborne-collision-avoidance-system-market-report-till-2024-by-decisiondatabases/>
- [10] Boletín Oficial del Estado, Ministerio de la Presidencia. “Real Decreto 1036/2017”. 29-12-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2017/12/29/pdfs/BOE-A-2017-15721.pdf>



- [11] Boletín Oficial del Estado, Ministerio de la Presidencia. “Real Decreto 552/2014”. 01-07-2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2014/07/01/pdfs/BOE-A-2014-6856.pdf>
- [12] Volair, "Nueva ley de Drones 2018", *Volair*, 05-01-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.volair.es/nueva-ley-de-drones-2018/>
- [13] Darpa, "Remote Troops Closer to Having High\_Speed Wireless Networks Mounted on UAVs", *DARPA*, 04-07-2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.darpa.mil/news-events/2014-04-07>
- [14] Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa, Wikipedia, 24-03-2018. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Agencia\\_de\\_Proyectos\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Avanzados\\_de\\_Defensa](https://es.wikipedia.org/wiki/Agencia_de_Proyectos_de_Investigaci%C3%B3n_Avanzados_de_Defensa)
- [15] A. Raya, "El proyecto de Google que iba a usar drones para ofrecer Internet ha sido cerrado", *Onmicrono*, 11-01-2017. [En línea]. Disponible en: <https://omicrono.elespanol.com/2017/01/drone-de-google/>
- [16] A. Raya, "Cómo funciona Project Loon de Google, los globos que dan Internet", *Onmicrono*, 09-03-2015. [En línea]. Disponible en: <https://omicrono.elespanol.com/2015/03/como-funciona-project-loon/>
- [17] A. Satariano, "Facebook Halts Aquila, Its Internet Drone Project", *The New York Times*, 27-06-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.nytimes.com/2018/06/27/technology/facebook-drone-internet.html>
- [18] J. Sepúlveda, "Vodafone, líder tecnológico controlando el tráfico aéreo", *Dronica*, 07-11-2017. [En línea]. Disponible en: <https://dronica.es/vodafone-controla-trafico-aereo/>
- [19] Iniciales nombre Apellidos autor, "Título del artículo web/post", Título del web/blog en cursiva, Fecha de publicación. [En línea]. Disponible en: URL del recurso.
- [20] Raspberry PI Foundation. “Especificaciones Raspberry PI Model B”. [En línea]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [21] Documentación del software de vuelo dRonin [En línea]. Disponible en: <https://dronin.org/docs/>
- [22] Joyplanes RC, "Motores brushless o sin escobillas | RC para principiantes", *YouTube*, 16-09-2017. [Video en línea]. Disponible en: <https://youtu.be/KFbSPnJ7CXc>
- [23] A2212/13T Technical data, *RHYDOLABZ*. [En línea]. Disponible en: [https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC\\_A2212\\_13T.pdf](https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf)

- [24] FlyBrushless, “Suppo – A2212/13”. [En línea]. Disponible en: <http://www.flybrushless.com/motor/view/206>
- [25] YinYan Model Tech. “EMAX User Instruction for SimonK Series ESC”. [En línea] Disponible en: <http://yinyanmodel.com/EMAX%20User%20Instruction%20for%20Simonk%20Series%20ESC.pdf>
- [26] Revolution Board Setup, LibrePilot/OpenPilot Wiki. [En línea]. Disponible en: [https://openpilotwiki.readthedocs.io/en/latest/user\\_manual/revo/revo.html](https://openpilotwiki.readthedocs.io/en/latest/user_manual/revo/revo.html)
- [27] Altitude Tech, "IOT BIT 4G, 3G V1.5 Hat for te Raspberry Pi", *Instructables*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/IoT-Bit/>
- [28] Experteer Comparador de Salario. [En línea]. Disponible en: [https://www.experteer.es/salary\\_calculator/calculate?salary%5Bcareer\\_level\\_id%5D=1&salary%5Bfunction\\_id%5D=13&salary%5Bindustry\\_id%5D=7700&salary%5Blocation\\_name%5D=Legan%C3%A9s&salary%5Blast\\_opened%5D=4](https://www.experteer.es/salary_calculator/calculate?salary%5Bcareer_level_id%5D=1&salary%5Bfunction_id%5D=13&salary%5Bindustry_id%5D=7700&salary%5Blocation_name%5D=Legan%C3%A9s&salary%5Blast_opened%5D=4)

